

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**





①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

①2 Offenlegungsschrift  
①0 DE 41 17 878 A 1

②1 Aktenzeichen: P 41 17 878.5  
②2 Anm. Idetag: 31. 5. 91  
④3 Offenlegungstag: 12. 12. 91

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
H 01 F 17/04  
H 01 F 19/04  
H 01 F 15/14  
H 01 F 15/10  
H 01 F 15/04  
H 01 L 49/00  
// H 01 F 41/04, 41/14,  
H 02 M 3/00, H 03 F  
3/191

DE 41 17 878 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1

31.05.90 JP 139989/90 09.10.90 JP 269397/90  
09.10.90 JP 269398/90 29.03.91 JP 91614/91  
30.03.91 JP 93434/91 30.03.91 JP 93717/91

⑦1 Anmelder:

Kabushiki Kaisha Toshiba, Kawasaki, Kanagawa, JP

⑦4 Vertreter:

Kramer, R., Dipl.-Ing.; Weser, W., Dipl.-Phys.  
Dr.rer.nat.; Hoffmann, E., Dipl.-Ing., 8000 München;  
Blumbach, P., Dipl.-Ing.; Zwirner, G., Dipl.-Ing.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing., Pat.-Anwälte, 6200 Wiesbaden

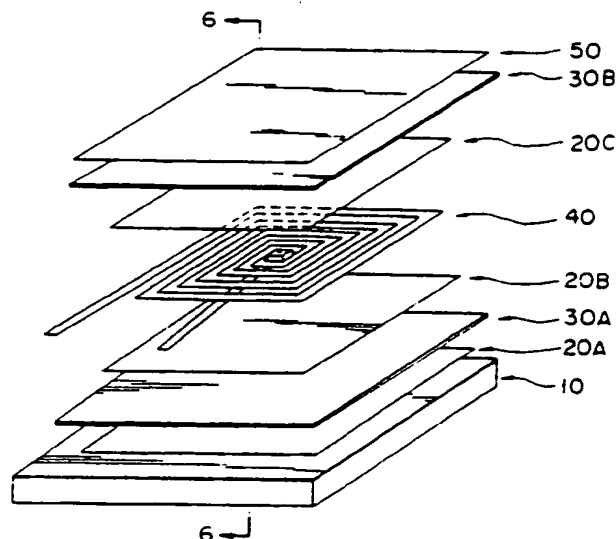
⑦2 Erfinder:

Mizoguchi, Tetsuhiko; Sato, Toshiro; Sahashi,  
Masashi; Hasegawa, Michio, Yokohama, JP; Tomita,  
Hiroshi, Tokio/Tokyo, JP; Sawabe, Atsuhito,  
Yokosuka, Kanagawa, JP

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Planares magnetisches Element

⑤7 Ein planares magnetisches Element umfaßt ein Substrat (10), eine darauf angeordnete erste magnetische Schicht (30A), eine über der ersten magnetischen Schicht angeordnete Isolierschicht (20B), eine aus einem Leiter gebildete planare Spule (40) mit mehreren Windungen, die über der ersten Isolierschicht angeordnet ist und ein Lücken-Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist, wobei es sich um das Verhältnis der Leiter-Dicke zu der Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen handelt, eine zweite Isolierschicht (20C) über der planaren Spule, und eine zweite magnetische Schicht (30B) über der zweiten Isolierschicht. Bei Verwendung als Induktivitäts-Bauelement besitzt das planare magnetische Element einen hohen Gütekoeffizienten Q. Bei Verwendung als Transformator besitzt es eine hohe Verstärkung und ein hohes Spannungsverhältnis. Da das Element klein und dünn ist, eignet es sich zur Verwendung in einer integrierten Schaltung und fördert in starkem Maße die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente.



DE 41 17 878 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein planares magnetisches Element, wie beispielsweise eine planare Induktionsspule oder einen planaren Transformator.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Typen elektrischer Anlagen und Bauelemente miniaturisiert. Magnetische Elemente, wie zum Beispiel Spulen und Transformatoren, die für eine Stromversorgung einer elektrischen Anlage unerlässlich sind, können weder verkleinert noch mit übrigen Schaltungsbauteilen integriert werden, wohingegen die übrigen Teile der Schaltung erfolgreich in Form von integrierten Großschaltkreisen (LSI) verkleinert werden konnten. Deshalb ist das Volumenverhältnis des Stromversorgungsteils gegenüber den anderen Schaltungsteilen insgesamt unvermeidlich vergrößert worden.

Um die Abmessungen von magnetischen Elementen, wie beispielsweise Induktionsspulen und Transformatoren, zu verringern, wurde versucht, kleine planare Induktivitäten und planare Transformatoren herzustellen. Im folgenden werden die Begriffe "Induktivität" und "Spule" einerseits für ein Bauteil verwendet, während der Begriff "Induktivität" auch als Eigenschaft verwendet wird, soweit Klarheit darüber besteht, wann der Begriff "Induktivität" ein Bauteil und wann er die Eigenschaft eines Bauteils bezeichnet. Eine herkömmliche planare Induktivität enthält eine planare Spule, zwei die Spule umfassende Isolierschichten sowie zwei Magnetplatten, welche die Spule und die Isolierschichten einschließen. Ein herkömmlicher planarer Transformator enthält zwei planare spiralförmige Spulen, die als Primär- beziehungsweise als Sekundärwicklungen dienen, zwei diese Spulen sandwichartig einschließende Isolierschichten sowie zwei Magnetschichten, welche die Spulen und die Isolierschichten sandwichartig einschließen. Die planaren Spiralspulen, die in die Induktivität und in den Transformator eingebaut sind, sind von einem zweier möglicher Typen. Der erste Typ wird durch einen spiralförmigen Leiter gebildet. Der zweite Typ enthält eine Isolierschicht und zwei spiralförmige Leiter, die auf den beiden Hauptebenen der Isolierschicht angebracht sind, um Magnetfelder zu erzeugen, die sich in dieselbe Richtung erstrecken.

Derartige planare Elemente sind beschrieben in dem Aufsatz von K. Yamasawa: High-Frequency of a Planar-Type Microtransformer and its Application to Multilayered Switching Regulators, IEEE, Trans. Mag., Band 26, Nr. 3, Mai 1990, Seiten, 1204 – 1209. Wie in diesem Aufsatz erläutert ist, besitzen die planaren Elemente einen hohen Leistungsverlust. Ähnliche planare magnetische Elemente sind auch in der US-PS 48 03 609 beschrieben.

Es wurde vorgeschlagen, zur Miniaturisierung dieser planaren magnetischen Elemente die Dünnschichttechnik einzusetzen.

Planare Induktivitäten mit dem oben angegebenen Aufbau müssen einen ausreichenden Gütekoeffizienten  $Q$  in dem Frequenzband aufweisen, für welches sie eingesetzt werden. Planartransformatoren des oben beschriebenen Aufbaus müssen eine vorbestimmte Verstärkung  $G$  haben, die zum Anheben der Eingangsspannung größer als 1 und zum Erniedrigen der Eingangsspannung kleiner als 1 ist, und sie müssen außerdem Spannungsschwankungen minimieren. Der Wert  $Q$  einer planaren Induktivität ist:

$$Q = H L / R,$$

wobei  $R$  der Widerstand der Spule und  $L$  der Induktivitätswert der Induktionsspule ist.

Die Spannungsverstärkung  $G$  eines planaren Transformators ohne Last lautet:

$$G = k(L_2/L_1)^{1/2}\{Q/(1+Q^2)^{1/2}\}$$

wobei  $k$  der Kopplungsfaktor zwischen Primär- und Sekundärwicklung ist,  $L_1$  und  $L_2$  die Induktivitäten der Primär- beziehungsweise Sekundärwicklung sind, der Gütekoeffizient  $Q$  sich aus  $H L_1 / R_1$  berechnet und  $R_1$  der Widerstand der Primärwicklungsspule ist. Die Verstärkung  $G$  ist praktisch proportional zu  $Q$ , falls  $Q \gg 1$ , während sie einen konstanten Wert  $k(L_2/L_1)^{1/2}$  hat, wenn  $Q \ll 1$ .

Zum Erhöhen der Gütezahl  $Q$  der Induktivität sowie zum Erhöhen der Verstärkung  $G$  des Transformators zur Begrenzung der Spannungsschwankung ist es notwendig, den Widerstand der Spule soweit wie möglich zu reduzieren und gleichzeitig deren Induktivität heraufzusetzen. Bei den herkömmlichen planaren magnetischen Elementen, die in Dünnschichttechnik hergestellt sind, können allerdings die Spulenleiter, die in einer Ebene ausgeführt werden müssen, keine große Querschnittsfläche besitzen. Deshalb können diese Elemente nur einen sehr hohen Widerstand und eine sehr kleine Induktivität aufweisen. Folglich besitzt die herkömmliche planare Induktivität eine unzureichende Gütezahl  $Q$ , während der herkömmliche planare Transformator oder Übertrager eine unzureichende Verstärkung  $G$  und eine große Spannungsschwankung aufweist. Diese Nachteile herkömmlicher planarer magnetischer Elemente waren bislang ein Hindernis dafür, daß diese Elemente in der Praxis eingesetzt wurden.

Von den planaren Spulen, die in planaren Induktivitäten verwendet werden können, sind die spiralförmigen Spulen am meisten bevorzugt, weil sie eine große Induktivität und eine hohe Gütezahl  $Q$  aufweisen. Planare Induktivitäten mit jeweils einer spiralförmigen planaren Spule wurden hergestellt, und ein Beispiel für eine solche Induktivität ist in Fig. 1 skizziert. Gemäß Fig. 1 enthält die planare Induktivität eine die Form einer quadratischen Platte annehmend spiralförmige, planare Spule, zwei diese Spule sandwichartig umfassende Polyimidschichten und zwei die Spule und die Polyimidschichten sandwichartig einschließende Bänder aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis. Diese Bänder werden hergestellt durch Ausschneiden einer auf Co-Basis hergestellten amorphen Legierungsfolie, die durch eine schroffe Abschreckkühlung der geschmolzenen Legierung hergestellt wird. Diese planare Induktivität ist in eine Ausgangs-Drosselspule eingebaut, die in einem 5 V – 2 W Gleichstromwandler mit Abwärtstransformierung vom Zerkhackertyp verwendet wird, wie er von N.

Sahashi u.a. beschrieben ist in Amorphas Planar Inductor for Small Power Supplies, the National Convention Record, Institute of Electrical Engineers of Japan 1989, s. 18 – 5-3. Wie aus der grafischen Darstellung in Fig. 2A ersichtlich ist, fließen durch diese Drosselspule zwei Ströme. Der erste Strom ist ein Gleichstrom, welcher dem Laststrom entspricht. Der zweite Strom ist ein Wechselstrom, der durch den Betrieb eines Halbleiterschalters erzeugt wurde. Wenn der Gleichstrom zunimmt, verschiebt sich der Arbeitspunkt des weichmagnetischen Kerns in den Sättigungsbereich der B-H-Kurve. Im Ergebnis verringert sich die magnetische Permeabilität der magnetischen Legierung, wodurch die Induktivität abrupt abnimmt, wie in Fig. 2B gezeigt. Wie aus Fig. 3 ersichtlich, wird der Wechselstrom beim scharfen Abfall des Induktivitätswerts zu groß. Dieser übermäßige Wechselstrom stellt eine Belastung für den Halbleiterschalter dar, der in einigen Fällen möglicherweise sogar zerstört wird.

Es ist erwünscht, daß die elektrische Eigenschaft der Drosselspule, so zum Beispiel deren Induktivität, auch dann unverändert bleibt, wenn durch die Spule ein überlagerter Gleichstrom fließt. Fig. 4 ist eine grafische Darstellung, die den Verlauf eines typischen überlagerten Gleichstroms in der Spule darstellt, wobei die Beziehung zwischen dem Induktivitätswert einer Spule und einem durch diese Spule fließenden überlagerten Gleichstrom dargestellt ist.

Im Fall eines planaren Induktors ist die leitende Spule sehr nahe bei den weichmagnetischen Kernen und erzeugt mithin ein intensives Magnetfeld auch dann, wenn der durch die Spule fließende Strom ziemlich schwach ist. Damit gehen die weichmagnetischen Kerne sehr leicht in magnetische Sättigung. Es wird erläutert, wie eine solche magnetische Sättigung beispielsweise in einer planaren Induktivität eintritt, die eine spiralförmige planare Spule aus einer Al-Cu-Legierung, zwei die Spule einschließende Isolierschichten und zwei die Spule und die Isolierschichten zusammenklammernde Magnetschichten aufweist.

Die planare Spule dieser planaren Induktivität besteht aus einem Leiter mit einer Breite von 50 µm und einer Dicke von 10 µm. Die Spule besitzt 20 Windungen, wobei die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen 10 µm beträgt. Jede Isolierschicht hat eine Dicke von 10 µm, während jede Magnetschicht eine Dicke von 5 µm aufweist. Die planare Spule hat eine magnetische Sättigungsflußdichte  $B_s$  von 15 kG und eine magnetische Permeabilität  $\mu_s$  von 5000.

Wenn man annimmt, daß der Al-Cu-Leiter eine zulässige Stromdichte von  $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  besitzt, so beträgt der zulässige Strom  $I_{\text{max}}$  250 mA. Die Anmelderin hat die planare Induktivität geprüft, um die Beziehung zwischen dem durch die Spule fließenden Strom und der Stärke des Magnetfelds, das in der Oberfläche der magnetischen Schicht aus dem Strom erzeugt wird, zu bestimmen. Die Prüfungsergebnisse zeigten, daß beide Magnetschichten magnetisch gesättigt waren, als der Strom durch die Al-Cu-Spule 48 mA und mehr betrug. Hieraus folgt, daß, wenn eine solche planare Induktivität als Drosselspule verwendet wird, der maximale überlagerte Gleichstrom auf 48 mA begrenzt ist. Dieser Wert ist nicht mehr als etwa ein Fünftel des zulässigen Spulenstroms  $I_{\text{max}}$ . Die Magnetschichten gehen unvermeidlich leicht in die magnetische Sättigung.

Der begrenzte überlagerte Gleichstrom ist ein Nachteil, der nicht nur in der als Drosselspule verwendeten planaren Induktivität gravierend ist, sondern auch in einem planaren Transformator. In einem planaren Transformator, der zum Beispiel in einem DC-DC-Umrichter für die Spannungsübersetzung oder die Zeilenablenkung eingesetzt ist, wird eine impulsförmige Spannung einer Polarität an die Primärspule gelegt. Die magnetischen Schichten werden dadurch magnetisch gesättigt, wodurch die Induktivität des Transformators abrupt abnimmt.

Folglich wurden Versuche unternommen, eine planare Induktivitätsspule und einen planaren Transformator zu schaffen, die derart ausgebildet sind, daß der Einfluß der Sättigung der magnetischen Schichten reduziert ist, um auf diese Weise den maximalen überlagerten Gleichstrom des Bauelements, welches die planare Induktivität oder den planaren Transformator enthält, zu erhöhen und wirksamen Nutzen aus der magnetischen Anisotropie der Magnetschichten zu ziehen.

Planare Spulen lassen sich in verschiedene Typen unterteilen, so zum Beispiel gibt es den Zick-Zack-Typ, den Spiraltyp, den Zick-Zack/Spiraltyp und dergleichen, abhängig von dem jeweiligen Muster der Spule. Von diesen Typen kann der Spiraltyp den größten Induktivitätswert besitzen. Folglich läßt sich eine spiralförmige Planarspule kleiner ausbilden als jeder andere Spulentyp mit dem gleichen Induktivitätswert. Um die Anschlüsse der spiralförmigen Planarspule zu bilden, ist es allerdings notwendig, zwei in verschiedenen Ebenen befindliche Spiralspulen mit Hilfe einer Durchkontaktierung zu verbinden, oder Leiter zu verwenden, mit denen die Anschlüsse nach außen geführt sind. Der Herstellungsprozeß einer spiralförmigen Planarspule ist allerdings komplexer als die Herstellung anderer Typen von Planarspulen.

Für die Gestalter elektronischer Schaltungen ist es wünschenswert, daß planare magnetische Elemente in eine Schaltung eingebaut werden, die eine sogenannte "Trimm-Funktion" besitzen, das heißt die Möglichkeit bieten, daß die Eigenschaften und Kennwerte der Elemente auf für die Schaltung geeignete Werte einstellbar sind. In der Tat wurde bereits auch ein magnetisches Element mit einer solchen "Trimm-Funktion" entwickelt. Dieses Bauelement besitzt eine Schraube, die durch Drehen ihre Lage bezüglich des Kerns der Spule verändert, um auf diese Weise den Induktivitätswert des magnetischen Elements kontinuierlich zu ändern. Allerdings haben die meisten herkömmlichen planaren magnetischen Elemente keine "Trimm-Funktion", und zwar aus folgendem Grund:

Wie bekannt, hängen die Kennwerte von planaren magnetischen Elementen in starkem Maß von den strukturellen Parametern und den Kennwerten der planaren Spulen und magnetischen Schichten ab. Diese Kennwerte der magnetischen Elemente bestimmenden Faktoren hängen ab von den Herstellungsschritten der Elemente. Da diese Schritte kaum unter identischen Bedingungen durchgeführt werden können, schwanken die Eigenschaften der sich ergebenden Bauelemente stark. Naturgemäß ist es wünschenswert, daß die Elemente mit der "Trimm-Funktion" ausgestattet sind. Allerdings können sie die "Trimm-Funktion" aufgrund ihrer speziellen strukturellen Beschränktheit nicht aufweisen.

Ein Transformator mit hoher Ausgangsleistung ist offenbart in A.F. Goldberg u. a., Issues Related to 1 – 10 MHz Transformer Design, IEEE Transactions Power Electronics, Band 4, Nr. 1. Januar 1989, Seiten

113 - 123.

Wie oben ausgeführt ist, wurden bislang keine planaren magnetischen Elemente produziert, die klein genug sind, um mit anderen Schaltungselementen integriert werden zu können, so daß es nicht möglich ist, in der Praxis ausreichend kleine integrierte LC-Schaltungsabschnitte herzustellen, wobei der Stromversorgungs- teil ein Beispiel ist.

Da die mehrschichtigen planaren Induktivitäten im wesentlichen einen offenen Magnetkreis besitzen, ist es schwierig, folgenden beiden Erfordernissen zu genügen:

- 1) Sie besitzen keine Leckflüsse und beeinflussen nur geringfügig die anderen Bauteile der integrierten Schaltung (IC), in die sie eingebaut sind.
- 2) Sie haben einen hohen Induktivitätswert.

Deshalb können mehrschichtige planare Induktivitäten nicht zur Schaffung ausreichend kleiner, integrierter LC-Schaltungsabschnitte, zum Beispiel eines Stromversorgungs- teils, dienen.

Dementsprechend besteht noch ein starker Bedarf an planaren magnetischen Elementen zur Verwendung in einem Schaltungsabschnitt, welche die übrigen Komponenten der Schaltung wenig beeinflussen. Die herkömmlichen planaren magnetischen Elemente besitzen praktisch keine "Trimm-Funktion" aufgrund der ihnen eigenen strukturellen Beschränkungen.

Hauptaufgabe der Erfindung ist es, ein planares magnetisches Element zu schaffen, welches klein genug ist, um mit elektrischen Elementen anderer Typen zusammen integriert zu werden.

Außerdem soll die Erfindung ein planares magnetisches Element schaffen, welches eine ausreichend große Induktivität besitzt.

Ferner zielt die Erfindung ab auf die Schaffung eines planaren magnetischen Elements, das nur geringe Leckflüsse aufweist.

Ziel ist außerdem ein planares magnetisches Element, welches sich durch eine gute Hochfrequenz-Kennlinie und Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie auszeichnet;

ferner ein planares magnetisches Element mit hoher Stromaufnahmefähigkeit und mithin hohem Induktivitätswert;

ferner ein planares magnetisches Element, bei dem die Anschlüsse leicht nach außen zu leiten sind;

schließlich ein planares magnetisches Element mit Trimm-Funktion, so daß seine elektrischen Kennwerte von außen eingestellt werden können.

Die obigen Aufgaben und Ziele der Erfindung werden durch die nachstehend erläuterten sechs Aspekte der vorliegenden Erfindung gelöst beziehungsweise erreicht. Erfindungsgemäß haben die unterschiedlichen Aspekte entsprechenden Bauelemente jeweils bessere Kennwerte als die herkömmlichen Bauelemente, lassen sich in praktisch jeder möglichen Kombination einsetzen und können dadurch neue Typen planarer Elemente schaffen, die noch bessere Eigenschaften aufweisen und noch besser arbeiten.

Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches aufweist: eine spiralförmige, planare Spule mit einem Lücken-Geometrie- verhältnis (das heißt einem Verhältnis der Breite des Leiters bezüglich der Lücke zwischen den Leitern) von mindestens 1; Isolierteile, die mit der spiralförmigen planaren Spule laminiert sind; und magnetische Teile, die mit den Isolierteilen laminiert sind. Die Spule dieses planaren magnetischen Elements besitzt einen relativ niedrigen Widerstand. Deshalb besitzt die Spule einen hohen Güte- koeffizienten  $Q$ , wenn sie als Induktionsspule verwendet wird, und sie besitzt bei Verwendung als Transformator eine hohe Verstärkung. Mit anderen Worten: das Element besitzt ausreichende Fähigkeiten.

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine planare Spule aufweist, die aus einem Leiter gebildet ist, der ein Leiter-Geometrie- verhältnis (das heißt ein Verhältnis der Breite des Leiters zu dessen Dicke) von mindestens 1 aufweist. Hierzu sollte beachtet werden, daß, wenn dieses Element als Induktivität eingesetzt wird, seine Fähigkeit durch den zulässigen Strom und den Induktivitätswert bestimmt wird. Der zulässige Strom wiederum bestimmt sich durch die Querschnittsfläche des Leiters. Damit läßt sich der zulässige Strom dadurch erhöhen, daß man den Leiter breiter macht. Wenn der Leiter breiter gemacht wird, ist es jedoch unvermeidbar, eine größere Fläche in der Ebene zu belegen, was dem Erfordernis zuwiderläuft, das planare magnetische Element zu miniaturisieren. Andererseits läßt sich die Induktivität des planaren magnetischen Elements in der Tat dadurch erhöhen, daß man den Leiter mehrere Male umbiegt und so eine Spule mit mehreren Windungen bildet. Je mehr Windungen, desto größer die Fläche, die von der Spule belegt wird. Dies läuft ebenfalls dem Erfordernis der Miniaturisierung zuwider. Das erfindungsgemäße planare magnetische Element kann einen ausreichend starken zulässigen Strom aufweisen, da der Leiter ein Geometrie- verhältnis von mindestens 1 aufweist.

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird eine mehrschichtige planare Induktivität geschaffen, die eine spiralförmige planare Spule und diese planare Spule sandwichartig einschließende magnetische Elemente aufweist. Die magnetischen Elemente besitzen eine Breite  $w$ , die um einen Wert von mehr als  $2\alpha$  größer ist als die Breite  $a_0$  der spiralförmigen planaren Spule. Es sei angemerkt, daß der Wert  $\alpha$  gleich  $(\mu_s g t/2)^{1/2}$  beträgt, wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der magnetischen Elemente ist,  $t$  die Dicke der magnetischen Elemente ist, und  $g$  der Abstand zwischen den magnetischen Elementen ist. Da  $w > a_0 + 2\alpha$ , besitzt diese planare Induktivität einen großen Induktivitätswert. Wenn beispielsweise  $w = a_0 + 2\alpha$ , so ist die Induktivität mindestens um das 1,8-fache größer als im Fall  $w = a_0$ . Die planare Induktivität hat nicht nur einen großen Induktivitätswert, sondern außerdem einen kleinen Leckfluß. Diesbezüglich eignet sich die planare Induktivität als Element zur Verwendung in einer integrierten Schaltung, um die elektronischen Bauelemente dünner zu gestalten.

Gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine

planare Spule und die Spule sandwichartig einschließende magnetische Schichten aufweist. Die magnetischen Schichten sind in einer einzelnen Achse, die sich in rechtem Winkel bezüglich der Richtung des von der Spule erzeugten Magnetfelds erstreckt, magnetisch anisotrop. Aufgrund der uniaxialen magnetischen Anisotropie der magnetischen Schichten weist das planare magnetische Element eine hervorragende Kennlinie bei Überlagerung eines Gleichstroms und im Hochfrequenzbereich auf. Das Element eignet sich zur Verwendung in Hochfrequenz-Schaltkreisen, zum Beispiel in Gleichspannungswandlern. Außerdem kann das Element klein gebaut und mit anderen elektrischen Elementen anderer Typen integriert werden, um eine integrierte Schaltung zu bilden.

Gemäß einem fünften Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element mit einer planaren Spule und sandwichartig die Spule einschließenden magnetischen Schichten geschaffen. Die planare Spule besteht aus mehreren, jeweils eine Windung aufweisenden planaren Spulen, die in derselben Ebene angeordnet sind und verschiedene Größen haben, wobei jede Spule einen Außenanschluß besitzt. Dieses planare magnetische Element kann einfach an eine externe Schaltung elektrisch angeschlossen werden und läßt sich durch externe Mittel trimmen, um die elektrischen Kennwerte einzustellen. Damit eignet sich das Element sehr gut zur Verwendung in einem Gleichstromwandler vom Zerschalttyp mit Aufwärtstransformierung, in Resonanz-Gleichstromwandlern und in sehr dünnen HF-Schaltungen zur Verwendung in Pagern.

Gemäß einem sechsten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine leitende Schicht und eine magnetische Schicht enthält. Die magnetische Schicht umgibt die leitende Schicht und bildet so einen geschlossenen magnetischen Kreis. Der in die Leiterschicht fließende Strom magnetisiert die magnetische Schicht in der Richtung des geschlossenen magnetischen Kreises. Dieses planare magnetische Element besitzt einen geringen Leckfluß und hohe Stromaufnahmefähigkeit. Es kann deshalb dazu dienen, elektronische Geräte dünner zu gestalten, wenn es in derartigen Geräten eingesetzt wird.

Die oben beschriebenen erfindungsgemäßen planaren magnetischen Elemente können nicht nur sehr klein ausgebildet sein, sondern können auch verbesserte Eigenschaften besitzen, wie sie allgemein für magnetische Elemente wie Induktionsspulen gefordert werden.

Die planaren Induktivitäten und Transformatoren gemäß der Erfindung, die planare Mikro-Spulen aufweisen, sind klein und können auf einem Halbleitersubstrat ausgebildet werden. Sie lassen sich deshalb mit aktiven Elementen (zum Beispiel Transistoren) und mit passiven Elementen (zum Beispiel Widerständen und Kondensatoren) integrieren, um mit diesen Elementen ein aus einem Chip bestehendes Halbleiterbauelement zu bilden. In anderen Worten: sie dienen zur Schaffung von kleinbemessenen elektronischen Bauelementen, die Induktivitäten und Transformatoren enthalten. Zusätzlich lassen sich die planaren Induktivitäten und Transformatoren gemäß der Erfindung mit Hilfe existierender Mikro-Technik herstellen, wie sie allgemein bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen zum Einsatz gelangt.

Wie aus der obigen Erläuterung ersichtlich ist, schafft die Erfindung kleine und dünne LC-Schaltungsabschnitte zum Einsatz in verschiedenen elektronischen Bauelementen und trägt schließlich zur Miniaturisierung elektronischer Bauelemente bei.

Im folgenden werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine auseinandergezogene Darstellung einer herkömmlichen planaren Induktivität mit amorphen magnetischen Bändern und quadratischen, spiralförmigen Planar-Spulen;

Fig. 2A und 2B die Strom-Wellenformen des durch die Ausgangs-Drosselspulen herkömmlicher Gleichstromwandler fließenden Stroms;

Fig. 3 eine grafische Darstellung der B-H-Kurve des in Fig. 1 dargestellten weichmagnetischen Kerns;

Fig. 4 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 1 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 5 bis 11 Diagramme und grafische Darstellungen, die zum Erläutern des ersten Aspekts der Erfindung dienen;

Fig. 5 eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung;

Fig. 6 eine Schnittansicht, die schematisch die planare Induktivität gemäß Fig. 5 darstellt;

Fig. 7 eine Draufsicht auf einen planaren Transformator gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung;

Fig. 8 eine Schnittansicht, die den planaren Transformator gemäß Fig. 7 zeigt;

Fig. 9 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis der Induktivität gemäß Fig. 5 und deren Spulenwiderstand und deren Induktivitätswert;

Fig. 10 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis der Induktivität nach Fig. 5 bezüglich deren L/R-Wert;

Fig. 11 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis des Transformators gemäß Fig. 7 und dessen Verstärkung;

Fig. 12A bis 22 Diagramme und Grafiken zum Veranschaulichen und Erläutern des zweiten Aspekts der Erfindung;

Fig. 12A eine auseinandergezogene Darstellung eines magnetischen Elements gemäß dem ersten und dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches nicht nur ein hohes Leiter-Geometrieverhältnis, sondern auch ein hohes Lücken-Geometrieverhältnis aufweist;

Fig. 12B eine Schnittansicht entlang der Linie 12B-12B in Fig. 12A;

Fig. 13A bis 13D und Fig. 14 Diagramme, die zeigen, wie unter den Windungen des Spulenleiters in dem in Fig. 12A und 12B gezeigten magnetischen Element Hohlräume ausgebildet werden;

Fig. 15 eine perspektivische Darstellung eines planaren Kondensators gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, der als Kondensator mit parallelen Elektroden ausgebildet ist;

Fig. 16 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des Wertes  $C/C_0$  des in Fig. 15 dargestellten planaren Kondensators von dem Wert  $k$ ;

Fig. 17 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches eine einzelne planare Spule enthält;

Fig. 18 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches mehrere planare, zusammenlamierte Spulen aufweist;

Fig. 19A und 19B Draufsichten auf zwei modifizierte Ausführungsformen der in dem magnetischen Element gemäß Fig. 17 und 18 verwendeten planaren Spulen;

Fig. 20 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, umfassend eine planare Spule, ein Substrat und eine Bindeschicht zwischen der Spule und dem Substrat;

Fig. 21 eine Schnittansicht eines Mikro-Transformators gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung;

Fig. 22 ein Diagramm, welches zwei Typen von planaren Spulen gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung aufweist;

Fig. 23 bis 28 Diagramme und grafische Darstellungen, die den dritten Aspekt der Erfindung darstellen und erläutern;

Fig. 23 und 24 auseinandergezogene Darstellungen zweier Typen von Induktivitäten gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung;

Fig. 25A bis 25C Schnittansichten der in Fig. 23 dargestellten Induktivität, um zu veranschaulichen, wie aus der Induktivität magnetische Flüsse lecken;

Fig. 26 ein Diagramm zum Veranschaulichen der Verteilung des Magnetfeldes an den Enden der planaren Spiralspule in der in Fig. 23 gezeigten Induktivität;

Fig. 27 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen der Breite  $w$  der Magnetglieder in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Lecken der Magnetflüsse;

Fig. 28 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen der Breite  $w$  der Magnetglieder in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Induktivitätswert der Induktivität;

Fig. 29 bis 48 Diagramme und grafische Darstellungen zum Erläutern des vierten Aspekts der Erfindung;

Fig. 29 eine auseinandergezogene Darstellung einer ersten planaren Induktivität, die gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung eine uniaxiale magnetische Anisotropie besitzt;

Fig. 30 ein Diagramm zum Veranschaulichen der Beziehung zwischen der Richtung des Magnetfelds, das von der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten Spule erzeugt wird, und der Achse der leichten Magnetisierung der magnetischen Kerne;

Fig. 31 eine grafische Darstellung der Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung der Induktivität (Fig. 29) und einer Magnetisierungskurve in der Achse der harten Magnetisierung der Magnetkerne;

Fig. 32A ein Diagramm der Verteilung der Magnetflüsse in solchen Bereichen der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten magnetischen Elemente, in denen sich das Magnetfeld parallel zu der Achse leichter Magnetisierung erstreckt;

Fig. 32B ein Diagramm der Verteilung der Magnetflüsse in solchen Bereichen der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten magnetischen Elemente, in denen sich das Magnetfeld in rechten Winkeln zu der Achse der leichten Magnetisierung erstreckt;

Fig. 33 eine auseinandergezogene Darstellung einer zweiten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 34 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 35 eine auseinandergezogene Darstellung einer modifizierten Form der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 36 eine auseinandergezogene Darstellung, die eine dritte planare Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung veranschaulicht;

Fig. 37 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 36 gezeigten planaren Induktivität;

Fig. 38 eine auseinandergezogene Darstellung einer vierten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 39 eine perspektivische Ansicht der Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht, die in die Induktivität gemäß Fig. 38 eingebaut ist;

Fig. 40 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Parametern der Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht der Induktivität (Fig. 38) und des zweiten Terms der  $U_k$  definierenden Formel;

Fig. 41 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 38 gezeigten planaren Induktivität;

Fig. 42A eine grafische Darstellung einer Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung der Induktivität (Fig. 38) und einer Magnetisierungskurve in der Achse harter Magnetisierung des magnetischen Materials;

Fig. 42B eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz in der Achse leichter Magnetisierung, und auch der Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz in der Achse harter Magnetisierung;

Fig. 43A und 43B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer fünften planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 44 eine Draufsicht einer modifizierten Form der in den Fig. 34A und 43B dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 45 eine Draufsicht auf eine sechste planare Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 46A und 46B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht eines weiteren Typs einer planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;



Fig. 47A und 47B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer siebten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 48A und 48B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer achten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 49 bis 61 Diagramme und grafische Darstellungen zum Erläutern des fünften Aspekts der Erfindung;

Fig. 49 eine Draufsicht auf ein erstes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung;

Fig. 50 eine Draufsicht auf ein zweites magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung;

Fig. 51 eine Draufsicht auf ein drittes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, welches eine modifizierte Form des Elements nach Fig. 49 darstellt, in dem die Außenanschlüsse in besonderer Weise angeschlossen sind;

Fig. 52 eine Draufsicht auf ein drittes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, welches eine modifizierte Form des Elements nach Fig. 49 insofern ist, als die Außenanschlüsse in einer anderen Weise verbunden sind;

Fig. 53 eine Draufsicht eines dritten magnetischen Elements gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, bei dem es sich um eine Modifizierung des Elements nach Fig. 49 insofern handelt, als die Außenanschlüsse in noch anderer Weise verbunden sind;

Fig. 54 ein Diagramm, welches die Beziehung zwischen dem Induktivitätswert des in Fig. 49 gezeigten magnetischen Elements und der Art und Weise der Verbindung der Außenanschlüsse darstellt;

Fig. 55 eine Draufsicht auf einen planaren Transformator, der durch Verbinden der Außenanschlüsse des magnetischen Elements nach Fig. 49 in besonderer Weise hergestellt ist;

Fig. 56 eine Draufsicht, die einen planaren Transformator darstellt, der durch Verbinden der Außenanschlüsse des magnetischen Elements nach Fig. 49 in noch anderer Weise hergestellt ist;

Fig. 57 eine Draufsicht auf einen weiteren planaren Transformator, hergestellt durch Verbinden der Außenanschlüsse des Elements nach Fig. 49 in noch anderer Weise;

Fig. 58 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Spannungs- und Stromverhältnissen des magnetischen Elements nach Fig. 49 einerseits und der Art und Weise der Verbindung der Außenanschlüsse andererseits;

Fig. 59 eine Schnittansicht eines Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, einem auf dem Substrat gebildeten aktiven Element und einem gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung ausgebildeten magnetischen Element auf dem Halbleitersubstrat;

Fig. 60 eine Schnittansicht eines weiteren Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, einem in dem Substrat ausgebildeten aktiven Element, und magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, die oberhalb des aktiven Elements gelegen sind;

Fig. 61 eine Schnittansicht eines Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, die in dem Substrat ausgebildet sind, und einem oberhalb der magnetischen Elemente befindlichen magnetischen Element;

Fig. 62A bis 64 Diagramme und grafische Darstellung zum Veranschaulichen des sechsten Aspekts der Erfindung;

Fig. 62A eine Schnittansicht einer eine Windung aufweisenden Spule gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung;

Fig. 62B eine teilweise geschnittene, perspektivische Ansicht der mit einer Windung ausgebildeten Spule nach Fig. 62A;

Fig. 63A eine Schnittansicht der Spule mit einer Windung gemäß Fig. 62A, in Serie zu einer Spuleneinheit verschaltet;

Fig. 63B eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung umfassend eine Kombination aus zwei Spuleneinheiten des in Fig. 63A dargestellten Typs;

Fig. 64 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung, umfassend eine eine Windung aufweisende Spule des Typs nach Fig. 62A, magnetische Schichten und Isolierschichten;

Fig. 65 ein Diagramm zum Veranschaulichen des Kriteriums zur Auswahl eines Materials für die magnetischen Schichten, wobei die Beziehung dargestellt ist zwischen der Anzahl von Windungen einer spiralförmigen planaren Spule einerseits und dem maximalen Spulenstrom  $I_{max}$  und der Stärke (H) des durch Einspeisen des Stroms  $I_{max}$  in die spiralförmige Spule erzeugten Magnetfelds, andererseits;

Fig. 66 bis 72 Diagramme die verschiedene Bauelemente darstellen, in die die magnetischen Elemente gemäß der Erfindung eingebaut sind;

Fig. 66 ein Diagramm, welches schematisch einen Pager zeigt, der ein magnetisches Element gemäß der Erfindung enthält;

Fig. 67 eine Draufsicht auf ein 20-Pin-IC-Chip vom SIP-Typ (ein Gehäuse mit einer Reihe von Anschlußstiften), welches magnetische Elemente gemäß der Erfindung enthält;

Fig. 68 eine perspektivische Ansicht eines 40-Pin-IC-Chips vom DIP-Typ (Gehäuse mit zwei Reihen von Anschlußstiften);

Fig. 69 einen Schaltplan eines Gleichstromwandlers vom Aufwärtstransformierungs-Zerhacker-Typ;

Fig. 70 einen Schaltplan eines Gleichstromwandlers vom Abwärtstransformierungs-Zerhacker-Typ;

Fig. 71 eine Schaltungsskizze einer HF-Schaltung, wie sie für ein sehr kleines, mobiles Telefon verwendet wird;

Fig. 72 einen Schaltplan eines Resonanz-Gleichstromwandlers; und

Fig. 73 eine Schnittansicht einer planaren Spule für eine Ausführungsform.

Die im folgenden erläuterten Aspekte und Ausführungsbeispiele der Erfindung können miteinander kombiniert werden, so daß eine Vielfalt magnetischer Elemente entsteht, die erfindungsgemäß ausgebildet sind. Da die

Materialen der magnetischen Elemente für die verschiedenen n Aspekt der Erfindung im wesentlichen gemeinsam sind, sollen sie am Schluß der Beschreibung erläutert werden.

Der erste Aspekt der Erfindung soll unter Bezugnahme auf die Fig. 5 bis 11 erläutert werden.

Fig. 5 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung. Wie in Fig. 5 gezeigt ist, enthält die planare Induktivität ein Halbleitersubstrat 10, drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, eine spiralförmige planare Spule 40 und eine Schutzschicht 50. Die Isolierschicht 20A ist auf dem Substrat 10 gebildet. Die magnetische Schicht 30A ist auf der Schicht 20A gebildet. Die Isolierschicht 20B ist auf der magnetischen Schicht 30A gebildet. Die Spule 40 ist auf der Schicht 20B montiert. Die Isolierschicht 20C deckt die Spule 40 ab. Die magnetische Schicht 30B ist auf der Schicht 20C gebildet. Die Schutzschicht 50 ist auf der magnetischen Schicht 30B gebildet. Fig. 6 ist eine Schnittansicht entlang der Linie 6-6 in Fig. 5 und zeigt einen Teil der planaren Induktivität. In Fig. 6 sind gleiche Komponenten wie in Fig. 5 mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Fig. 7 ist eine auseinandergezogene Darstellung eines planaren Transformators gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung. Dieser Transformator ist dadurch gekennzeichnet, daß die Primär- und die Sekundärspule die gleiche Windungszahl aufweisen. Wie aus Fig. 7 hervorgeht, enthält der Transformator ein Halbleitersubstrat 10, vier Isolierschichten 20A bis 20D, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, zwei spiralförmige planare Spulen 40A und 40B, und eine Schutzschicht 50. Die Schichten 20A, 30A und 20B sind übereinander auf dem Substrat 10 ausgebildet. Die Primärspule 40A ist auf der Isolierschicht 20B gebildet. Die Isolierschicht 20C liegt auf der Primärspule 40A. Die Sekundärspule 40B ist auf der Isolierschicht 20C gebildet. Die Isolierschicht 20D liegt auf der Sekundärspule 40B. Die magnetische Schicht 30B ist auf der Schutzschicht 20D gebildet. Die Schutzschicht 50 ist auf der magnetischen Schicht 30B gebildet. Fig. 8 ist eine Schnittansicht entlang der Linie 8-8 in Fig. 7 und zeigt einen Teil des planaren Transformators. In Fig. 8 sind gleiche Teile wie in Fig. 7 mit entsprechenden Bezugszeichen versehen.

Sowohl in der planaren Induktivität gemäß Fig. 5 und 6, als auch in dem planaren Transformator gemäß Fig. 7 und 8 besteht das Substrat 10 aus Silicium. Das Siliciumsubstrat 10 kann durch ein Glassubstrat ersetzt werden. Wird ein Glassubstrat anstelle des Siliciumsubstrats 10 verwendet, so kann die unterhalb der magnetischen Schicht 30A befindliche Isolierschicht 20A weggelassen werden.

Die spiralförmige planare Spule 40 in der Induktivität gemäß Fig. 5 und die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B in dem Transformator nach Fig. 7 besitzen ein Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  von mindestens 1, wobei  $h$  die Dicke des Spulenleiters und  $b$  die Lücke oder der Abstand zwischen zwei benachbarten Windungen ist. Zur Bildung einer spiralförmigen planaren Spule mit einem solchen Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  kommen zwei alternative Verfahren in Betracht. Nach dem ersten Verfahren erfolgt ein tiefes Ätzen einer leitenden Schicht, um auf diese Weise einen spiralförmigen Schlitz in der Platte zu bilden, woraufhin der spiralförmige Schlitz mit isolierendem Material gefüllt wird. Nach dem zweiten Verfahren erfolgt eine Trockenätzung auf einer Isolierschicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der Schicht zu bilden, der dann mit leitendem Material gefüllt wird.

Das erste Verfahren läßt sich in zwei Varianten ausführen. Nach der ersten Variante wird der spiralförmige Schlitz mit isolierendem Material gefüllt. Bei der zweiten Variante wird der Schlitz teilweise gefüllt, so daß in dem sich ergebenden Spulenleiter ein Hohlraum gebildet wird. Die erste Variante fällt unter den ersten Aspekt der Erfindung, während die zweite Variante unter den zweiten Aspekt der Erfindung fällt.

Gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung wird die spiralförmige planare Spule auf folgende Weise hergestellt: Zunächst wird auf einer Isolierschicht eine leitende Schicht gebildet. Dann wird auf der leitenden Schicht eine Maskenschicht gebildet. Die Maskenschicht wird bearbeitet, damit in der Maskenschicht ein spiralförmiger Schlitz gebildet wird. Mit Hilfe dieser Maskenschicht wird ein in hohem Maße richtungsgebundenes Trockenätzen durchgeführt, zum Beispiel Ionenstrahlätzen, ECR-Plasma-Ätzen, reaktives Ionenätzen der leitenden Schicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der leitenden Schicht und gleichzeitig einen Spulenleiter mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  von 1 oder mehr auszubilden. Es ist erforderlich, daß die Ätzgeschwindigkeit der Maskenschicht sich stark von derjenigen der Leiterschicht unterscheidet, so daß vertikales anisotropes Ätzen erreicht wird.

Um auf dem Spulenleiter mit einem hohen Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  eine Isolierschicht zu bilden, ist es wünschenswert, daß die Lücke zwischen den Windungen mit Isoliermaterial gefüllt wird, das einen kleinen Dielektrizitätskoeffizienten aufweist, während die Masse des Isoliermaterials so bearbeitet wird, daß eine flache Oberseite entsteht. Ist das Isoliermaterial ein anorganischer Stoff, wie beispielsweise  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , so wird zur Bildung der Isolierschicht das CVD-Verfahren oder das Aufsprühverfahren eingesetzt (zum Beispiel das reaktive Zerstäuben oder das Zerstäuben unter Vorspannung). Handelt es sich bei dem Isoliermaterial um einen organischen Stoff, so ist Polyimid bevorzugt (einschließlich eines fotoempfindlichen Stoffs). Statt dessen kann auch ein Resistmaterial verwendet werden. Das isolierende Material, sei es organisch, sei es anorganisch, wird mit einem Lösungsmittel gemischt, um eine Lösung zu erhalten. Die Lösung wird im Schleuderverfahren auf das Substrat aufgebracht. Die Beschichtung wird mittels eines geeigneten Verfahrens ausgehärtet, so daß sich die Isolierschicht ausbildet. Die so gebildete Isolierschicht wird in der Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters einem Rück-Ätz-Prozeß ausgesetzt, so daß eine flache Oberseite entsteht.

Das zweite Verfahren zur Bildung der spiralförmigen planaren Spule, welches unter den zweiten Aspekt der Erfindung fällt, wird im folgenden erläutert. Bei diesem Verfahren wird zunächst eine Isolierschicht gebildet. Auf der Isolierschicht wird ein Resistmaterial mit einem Muster versehen. Unter Verwendung des Resistmaterials als Maske erfolgt selektives Trockenätzen der Isolierschicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der Isolierschicht zu erhalten. Dann wird auf dem mit Muster versehenen Resistmaterial und in dem spiralförmigen Schlitz durch Kathodenzerstäubung, mittels CVD-Verfahren, Aufdampfen im Vakuum oder dergleichen eine leitende Schicht gebildet. Als nächstes wird das Resistmaterial von der Isolierschicht und der leitenden Schicht mittels eines

Abhebeverfahrens entfernt. Gleichzeitig werden solche Abschnitte der leitenden Schicht entfernt, die sich auf dem Resistmaterial befinden. Im Ergebnis entsteht eine spiralförmige planare Spule.

Welches von dem ersten oder zweiten Verfahren zur Bildung der spiralförmigen planaren Spule verwendet wird, hängt von dem Muster der planaren Spule ab.

Im folgenden werden die Vorteile der magnetischen Elemente gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung erläutert.

Fig. 9 zeigt die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis der planaren Induktivität gemäß Fig. 5 zu deren Spulenwiderstand, und außerdem den Induktivitätswert der Induktivität. Der Parameter der Induktivität  $L$  ist  $\mu_s t$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der Magnetschichten 30A und 30B und  $t$  die Schichtdicke ist. Im vorliegenden Fall beträgt  $\mu_s t = 5000 \mu\text{m}$  oder  $1000 \mu\text{m}$ . Wie aus Fig. 9 ersichtlich ist, ist der Induktivitätswert  $L$  der planaren Induktivität praktisch konstant, unabhängig von dem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$ . Der Widerstand der spiralförmigen planaren Spule 40 ist umgekehrt proportional zu dem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  und bleibt praktisch konstant, wenn das Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  den Wert 5 überschreitet.

Fig. 10 zeigt die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis der Induktivität gemäß Fig. 5 zu dem  $L/R$ -Wert.  $L/R$  ist eine physikalische Größe, die proportional zu dem Gütekoeffizienten  $Q$  der Induktivität ist, der seinerseits definiert ist durch  $Q = 21 f L/R$  mit  $f$  als Frequenz (Hz). In Fig. 10 ist die Beziehung für zwei Parameter dargestellt, nämlich die relativen Permeabilitäten  $\mu_s$  von  $10^4$  und  $10^3$  jeder der beiden magnetischen Schichten. Wie aus Fig. 10 ersichtlich ist, nimmt  $L/R$  mit zunehmendem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  zu, nicht jedoch über den Wert 5 hinaus, auch wenn das Verhältnis  $h/b$  weiter zunimmt.

Die Erfinder haben planare Induktivitäten des in Fig. 5 dargestellten Typs mit unterschiedlichen Lücken-Geometrie-Verhältnissen von 0,3; 0,5; 1,0; 2,0 und 5,0 hergestellt. Einige dieser Induktivitäten haben einen Parameter  $\mu_s t$  von  $5000 \mu\text{m}$ , der Rest hat einen Parameter  $\mu_s t$  von  $1000 \mu\text{m}$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität jeder der Magnetschichten und  $t$  deren Dicke ist. Die Erfinder haben diese planaren Induktivitäten geprüft, um zu sehen, wie deren Gütekoeffizienten  $Q$  von dem Lücken-Geometrie-Verhältnis abhängen. Die Testergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle niedergelegt:

Verhältnis $h/b$	$Q(f = 5 \text{ MHz})$	
	$\mu_s (\mu\text{m})$ $5 \times 10^3$	$1 \times 10^3$
0,3	5,5	1,4
0,5	13,5	3,3
1,0	19,8	4,9
2,0	22,9	5,7
5,0	25,0	6,3

Wie aus der Tabelle ersichtlich, ist der Koeffizient  $Q$  der planaren Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 1 etwa 3,5mal größer als derjenige der Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 0,3, und etwa 1,5mal größer als derjenige einer Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 0,5. Offensichtlich kann jede Induktivität des in Fig. 5 dargestellten Typs einen ausreichend großen Gütekoeffizienten  $Q$  besitzen, wenn ihr Lücken-Geometrie-Verhältnis 1 oder mehr beträgt.

Fig. 11 veranschaulicht die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis des planaren Transformators nach Fig. 7 und dessen Verstärkung. Wie die Fig. zeigt, kann der Transformator einen ausreichend großen Koeffizienten  $Q$  und mithin eine ausreichend große Verstärkung besitzen, wenn das Lücken-Geometrie-Verhältnis 1 oder mehr beträgt.

Eine der Determinanten für die Fähigkeit eines magnetischen Elements ist das Material des Elements. Folglich ist es wichtig, welches Material zur Bildung des magnetischen Elements verwendet wird. Dieser Punkt wird am Ende der Beschreibung weiter ausgeführt. Verschiedene planare magnetische Elemente gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, die gekennzeichnet sind durch ihr spezielles Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  ( $h$  ist die Höhe des Spulenleiters, und  $d$  ist dessen Breite), sollen im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 12A bis 22 erläutert werden.

Fig. 12A ist eine auseinandergezogene Darstellung eines planaren magnetischen Elements. Fig. 12B ist eine Schnittansicht entlang der Linie 12B-12B in Fig. 12A. Das planare magnetische Element hat nicht nur ein höheres Leiter-Geometrie-Verhältnis, sondern auch ein höheres Lücken-Geometrie-Verhältnis. Deshalb fällt das Element sowohl unter den ersten als auch unter den zweiten Aspekt der Erfindung.

Wie in den Fig. 12A und 12B gezeigt ist, enthält das planare magnetische Element ein Substrat 10 und eine spiralförmige planare Spule 40, die direkt auf dem Substrat 10 liegt. Der Spulenleiter 42 (Fig. 12B) kann durch ein bekanntes Verfahren ausgebildet werden, wie es üblicherweise bei der Ausbildung der Verdrahtung in Halbleiterbauelementen eingesetzt wird. Je kleiner die Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters 24, desto kleiner ist das planare magnetische Element. Allerdings gilt auch: je kleiner die Lücke, desto schwieriger ist es für das Element, ein ausreichend hohes Leiter-Geometrie-Verhältnis zu besitzen. Damit wird gefordert, daß eine Lücke zunächst auf den am meisten geeigneten Wert für den Einsatz des Elements festgelegt wird, so daß anschließend das Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  bestimmt wird. Gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beträgt das Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  mindestens 1. In anderen Worten: der Spulenleiter 42 besitzt eine Höhe, die gleich oder größer ist als die Breite  $d$ . Um das planare magnetische Element zu miniaturisieren, ist es

selbstverständlich wünschenswert, daß das Lücken-Geometrieverhältnis  $h/b$  so groß wie möglich ist. In der Praxis allerdings ist es zu empfehlen, daß sowohl die Breite  $d$  des Leiters 42 als auch die Lücke  $b$  zwischen den Windungen jeweils etwa  $10\text{ }\mu\text{m}$  oder weniger betragen.

Um einen Spulenleiter mit einem hohen Geometrieverhältnis  $h/d$  herzustellen, muß man einen schmalen Spiralabschnitt einer dicken leitenden Schicht ätzen. Damit ist es zu bevorzugen, als leitende Schicht eine Kristallschicht mit einer einfach zu ätzenden Ebene parallel zur Schicht selbst zur Verfügung zu haben. Selbstverständlich ist eine Einkristallschicht am meisten zu bevorzugen.

Abgesehen von seiner Struktur kann das planare magnetische Element gemäß Fig. 12A und 12B eine unzureichende Induktivität besitzen, wenn es zu klein ist. Dennoch kann seine Reaktanz  $HL$  ( $H$  ist die Kreisfrequenz) erhöht werden, indem das Element mit hoher Schaltfrequenz betrieben wird. In jüngster Zeit werden magnetische Elemente mit immer höheren Schaltfrequenzen betrieben. Die Reaktanz des in den Fig. 12A und 12B gezeigten planaren magnetischen Elements bereitet keinerlei Probleme, wenn aufgrund der Miniaturisierung des Elements eine Unzulänglichkeit entsteht. Die elektrische Induktivität kann die Funktion in einem Hochfrequenzbereich (zum Beispiel einige MHz) auch dann übernehmen, wenn die Induktivität nur im Bereich von  $nH$  liegt.

Wenn die Windungen eines Spulenleiters mit hohem Geometrieverhältnis  $h/d$  einander eng benachbart sind, ist die Zwischenwindungs-Kapazität groß wegen des schmalen Spalts zwischen zwei benachbarten Windungen und den relativ großen, einander gegenüberliegenden Flächen. Wegen der großen Zwischenwindungs-Kapazität kann das planare magnetische Element in einen LC-Kreis eingebaut werden. In den meisten Fällen jedoch verringert die Verwendung des Elements die LC-Resonanzfrequenz (allgemein als "Eckfrequenz" oder "Grenzfrequenz" bezeichnet), und das Element kann nicht länger als Induktivität arbeiten. Daher muß man die Zwischenwindungs-Kapazität auf ein Minimum herabsetzen. Diese Kapazität läßt sich dadurch reduzieren, daß man eine Isolierschicht (zum Beispiel aus  $\text{SiO}_2$ ) vorsieht, die eine Ausnehmung oder einen Hohlraum hat, der sich zwischen den Windungen des Spulenleiters erstreckt und den dielektrischen Koeffizienten zwischen den Windungen herabsetzt. Der Hohlraum kann Vakuum enthalten oder mit einem Gas gefüllt sein, das bei der Bildung der Isolierschicht verwendet wird. In jedem Fall ist der Zwischenwindungs-Dielektrizitätskoeffizient viel kleiner als dann, wenn die Lücke zwischen den Windungen mit dem Isoliermaterial gefüllt ist.

Zur Bildung einer Isolierschicht mit einem solchen Hohlraum reicht es aus, das CVD-Verfahren anzuwenden, wie es bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen üblich ist. Die Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters wird nicht vollständig mit dem Isoliermaterial (zum Beispiel  $\text{SiO}_2$ ) aufgefüllt, wie es bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen der Fall ist. Vielmehr wird eine Isolierschicht mit zunehmender Dicke durch Wachstum zuerst auf der Oberseite des Spulenleiters und dann auf den Seiten des oberen Abschnitts jeder Windung gebildet. Die Schicht an den Seiten jeder Windung wird wachsen gelassen, bis sie die Öffnung der Lücke zwischen den Windungen schließt. Um auf diese spezielle Weise die Isolierschicht durch Wachstum zu bilden, reicht es aus, die Gaszuführungsgeschwindigkeit auf einen geeigneten Wert einzustellen.

Wie aus Fig. 13A hervorgeht, wird das Materialgas 82 auf den Spulenleiter 42 auf dem Substrat 10 eingebracht. Für das Gas 82 ist es schwierig, bis zum Boden der Lücke zwischen den Spulenwindungen zu strömen. Folglich wächst rasch eine Isolierschicht 80 oben auf jeder Windung 42, die Isolierschicht wächst weniger rasch an den Seiten des oberen Abschnitts, wie in Fig. 13B zu sehen ist. Die Schicht 80 wächst oben an jeder Windung 42 dicker und schneller und wächst an den Seiten des oberen Abschnitts der Windung langsam. Wie in Fig. 13C gezeigt ist, berührt die Schicht 80 die an der nächsten Windung sich bildende Schicht. Die Schicht 80 wächst weiter und schließt die Öffnung zwischen den Windungen 42. Als Ergebnis ergibt sich die in Fig. 13D dargestellte Struktur, bei der ein Hohlraum 70 sich zwischen den Windungen des Spulenleiters 42 erstreckt.

Eine Isolierschicht mit einem Hohlraum kann auch mittels Zerstäubung gebildet werden, wie Fig. 14 zeigt. Genauer gesagt, Partikel des isolierenden Materials werden schräg auf einen Spulenleiter 42 unter einem Winkel  $\theta$  oben auf die Oberseite des Leiters 42 aufgestäubt. Die durch Aufstäuben gebildete Isolierschicht ist weniger glatt als die nach dem CVD-Verfahren gebildete Isolierschicht. Deshalb ist das Zerstäubungsverfahren nicht so empfehlenswert.

Die Herabsetzung der Zwischenwindungs-Kapazität, die sich aus dem sich zwischen den Windungen des Spulenleiters 42 erstreckenden Hohlraum 70 ergibt, soll unter Bezugnahme auf Fig. 15 erläutert werden, die einen planaren Kondensator gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung veranschaulicht, welcher zwei parallele Kondensatoreinheiten umfaßt.

Die obere Einheit enthält ein Isolierelement 20 und eine Elektrode 60B auf der Oberseite des Elements 20. Die untere Einheit enthält ein Isolierelement 20 und eine auf dessen Unterseite gebildete Elektrode 60A. Die Kondensatoreinheiten besitzen die gleiche Größe  $r(m) \times t(m)$ . Die Isolierelemente 20 haben eine Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$ . Sie sind um einen Abstand  $s$  voneinander entfernt. Wenn der Spalt  $s_0$  zwischen den Elektroden 60A und 60B mit dem gleichen Isolierstoff gefüllt wird, aus dem die Elemente 20 bestehen, sollte der Kondensator folgende Kapazität  $C_0$  aufweisen:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon t / s_0$$

wobei  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante von Vakuum ist.

Das Verhältnis der Kapazität  $C$  dieses Kondensators zu der Kapazität  $C_0$  ist folgendermaßen gegeben:

$$C/C_0 = 1/(k(\epsilon - 1) + 1)$$

wobei  $k$  das Verhältnis  $s/s_0$ , das heißt das Verhältnis des Volumens eines Hohlraums zu dem Raum  $s_0$  ist.

Fig. 16 zeigt, wie das Verhältnis  $C/C_0$  abhängt von dem Verhältnis  $K$ , wenn die Isolierelemente 20 aus  $\text{SiO}_2$

bestehen, dessen spezifische Dielektrizitätskonstante etwa 4 beträgt. Angenommen,  $k$  betrage  $1/3$  oder weniger, so ist die Kapazität  $C$  etwa  $1/2 C_0$  oder weniger. Unabhängig davon, ob die Lücke 70 zwischen den Isolierelementen 70 mit Gas gefüllt ist oder Vakuum enthält, sollte die Lücke wünschenswerterweise 1 oder mehr von dem Spalt  $s_0$  betragen.

Die planare Spule 40 (Fig. 12A) ist in eine planare Induktivität eingebaut. Diese Spule 40 hat nur einen unzureichenden Induktivitätswert. Deshalb ist es wünschenswert, daß eine magnetische Schicht so nahe wie möglich an der planaren Spule 40 angeordnet wird, so daß die magnetische Schicht als Magnetkern dienen kann. Um den Leckfluß auf ein Minimum zu reduzieren, sollte die Spule 40 besser zwischen zwei magnetischen Schichten liegen, wie dies in Fig. 17 gezeigt ist.

Wie aus Fig. 17 hervorgeht, enthält diese planare Induktivität ein beispielsweise aus Silicium bestehendes, isolierendes Substrat 10, eine magnetische Schicht 30A auf dem Substrat 10, eine auf der magnetischen Schicht 30A gebildete Isolierschicht 20A, eine auf der Isolierschicht 20A gebildete planare Spule 40, eine oben auf der Spule 40 befindliche Isolierschicht 20B und eine magnetische Schicht 30B. Die magnetischen Schichten 30A und 30B fungieren auch als magnetische Abschirmungen und reduzieren den Leckfluß auf praktisch null. Da praktisch keine Magnetflüsse aus der planaren Induktivität herauslecken, können andere elektronische Elemente in enger Nachbarschaft zu der planaren Induktivität angeordnet werden. Die planare Induktivität des in Fig. 17 dargestellten Typs trägt also wesentlich bei zur Miniaturisierung elektronischer Bauelemente.

Für einige spezielle Anwendungsfälle kann die in Fig. 17 dargestellte planare Induktivität modifiziert werden, indem eine oder beide magnetische Schichten 20A und 20B, die hier als Kerne dienen, entfernt werden.

Fig. 18 zeigt eine modifizierte Form der in Fig. 17 gezeigten planaren Induktivität. Diese Induktivität ist durch zwei Besonderheiten gekennzeichnet. Erstens besteht die Spule 40 aus drei übereinander angeordneten Einheiten. Zweitens werden zwei zusätzliche Isolierschichten 20C verwendet, die jeweils zwischen zwei benachbarten Spuleneinheiten 42 liegen. Offensichtlich besitzt die planare Spule 40 mehr Windungen als die Spule 40, die in der planaren Induktivität gemäß Fig. 17 eingebaut ist. Folglich kann die Induktivität gemäß Fig. 18 einen höheren Induktivitätswert besitzen, als die planare Spule gemäß Fig. 17.

In die erfindungsgemäßen planaren magnetischen Elemente lassen sich planare Spulen verschiedener Formen einbauen. Eine Form ist die in Fig. 19A dargestellte spiralförmige planare Spule. Eine andere Form ist die in Fig. 19B dargestellte mäanderförmige planare Spule. Die Spiralspule ist deshalb vorzuziehen bei planaren magnetischen Elementen, bei denen ein hoher Induktivitätswert erforderlich ist.

Grundsätzlich besitzen Spulenleiter 42 für die Verwendung in planaren magnetischen Elementen eine Höhe, die wesentlich größer ist als bei Leitern in Halbleiterbauelementen. Deshalb müssen einige Maßnahmen getroffen werden, um einen Spulenleiter 42 fest an dem Substrat zu halten. Man kann eine Bindschicht vorsehen, um den Leiter 42 an das Substrat zu binden, wie es in Fig. 20 gezeigt ist. Dort ist eine beispielsweise als Cr ausgebildete Bindschicht 25 mit dem gleichen Muster wie der Spulenleiter 42 auf einem Substrat 10 ausgebildet, wobei der Leiter 42 auf der Bindschicht 25 gebildet ist. Dieses Verfahren kann man auch auf die planaren Elemente gemäß dem ersten, dem dritten, dem vierten und dem fünften Aspekt der Erfindung anwenden.

Selbstverständlich muß der Spulenleiter 42 abhängig vom Verwendungszweck des planaren magnetischen Elements, in welches er eingebaut wird, ausgelegt werden. Folglich müssen die Windungs-Schrittweite, das Geometrieverhältnis  $h/d$  und weitere Merkmale des Leiters 42 abhängig vom Zweck festgelegt werden, für den das planare magnetische Element vorgesehen ist. Um die Größe des Elements zu reduzieren, ist es erforderlich, daß die Lücke  $b$  zwischen zwei benachbarten Windungen kleiner ist als die Breite  $d$  des Leiters 42. Es gibt keine besondere Beschränkung hinsichtlich der Lücke  $b$ , jedoch ist eine Lücke  $b$  von  $10\text{ }\mu\text{m}$  oder weniger empfehlenswert, nicht nur für die Elemente gemäß dem zweiten Aspekt, sondern auch für diejenigen gemäß den anderen Aspekten der Erfindung.

Die Beschreibung des zweiten Aspekts der Erfindung wurde beschränkt auf planare Induktivitäten mit jeweils einer planaren Spule. Allerdings ist der zweite Aspekt der Erfindung nicht auf planare Induktivitäten mit nur einer Spule beschränkt. Mikrotransformatoren mit jeweils zwei planaren Spulen fallen ebenfalls unter den zweiten Aspekt der Erfindung.

Fig. 21 zeigt einen solchen Mikrotransformator. Er enthält ein Substrat 10, drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B und zwei planare Spulen 40A und 40B. Das Substrat 10 besteht aus Silicium oder dergleichen. Die magnetische Schicht 30A ist auf dem Substrat 10 gebildet, die Isolierschicht 20A befindet sich auf der Schicht 30A. Die planare Spule 40A, die als Primärspule fungiert, ist auf der Schicht 20A. Die Isolierschicht 20B deckt die Spule 40A ab. Die planare Spule 40B, die als Sekundärspule fungiert, ist auf der Isolierschicht 20B angeordnet. Die Isolierschicht 20C bedeckt die Spule 40B. Die Magnetschicht 30B ist auf der Isolierschicht 20C gebildet. Die Magnetschichten 30A und 30B umschließen die die Primär- und Sekundärspulen umfassende Einheit sandwichartig.

Die Primärspule 40A und die Sekundärspule 40B können in derselben Ebene angeordnet werden, wie es in Fig. 22A gezeigt ist. Die Sekundärspule 40B erstreckt sich zwischen den Windungen der Primärspule 40A. Alternativ kann die Sekundärspule 40B in einem Bereich angeordnet werden, der von der Primärspule 40A bedeckt ist, wie dies in Fig. 22B gezeigt ist.

Im folgenden soll unter Bezugnahme auf die Fig. 23 bis 28 der dritte Aspekt der Erfindung beschrieben werden.

Fig. 23 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem dritten Aspekt. Wie in Fig. 23 gezeigt ist, umfaßt diese Induktivität zwei Isolierschichten 20A und 20B, zwei magnetische Schichten 30A und 30B und eine spiralförmige planare Spule 40, die sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20A und 20B eingefaßt ist, die aus den Schichten 20A und 20B sowie der Spule 40 bestehende Einheit wird sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30A und 30B eingefaßt. Die spiralförmige planare Spule 40 ist quadratisch, wobei jede Seite eine Länge  $a_0$  hat. Außerdem sind auch die magnetischen Schichten 30A und 30B quadratisch

mit einer Seitenlänge von jeweils  $w$ . Sie haben die gleiche Dicke  $t$ . Sie sind voneinander um ein Stück  $g$  beabstandet.

Fig. 24 ist ebenfalls eine auseinandergezogene Darstellung eines anderen Typs einer planaren Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung. Diese planare Induktivität enthält drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, zwei spiralförmige planare Spulen 40A und 40B und eine Durchkontaktierung 42. Die Isolierschicht 20C befindet sich zwischen den Spulen 40A und 40B. Die aus der Schicht 20C und den Spulen 40A und 40B bestehende Einheit ist sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20A und 20B eingefaßt. Die aus den Schichten 20A, 20B und 20C sowie den Spulen 40A und 40B bestehende Einheit ist sandwichartig zwischen den Magnetschichten 30A und 30B eingefaßt. Die Durchkontaktierung 42 erstreckt sich durch die Isolierschicht 20C und verbindet elektrisch die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B. Die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B sind quadratisch ausgebildet jeweils mit einer Seitenlänge von  $a_0$ . Außerdem sind die magnetischen Schichten 30A und 30B quadratisch mit einer Seitenlänge  $w$  und gleicher Dicke  $t$  ausgebildet. Die Schichten 30A und 30B sind um ein Stück  $g$  von einander beabstandet.

Die beiden in den Fig. 23 und 24 dargestellten planaren Induktivitäten sind hinsichtlich folgender Gesichtspunkte vorteilhaft, wenn geeignete Werte für  $a_0$ ,  $w$ ,  $t$  und  $g$  gewählt werden:

- 1) sie besitzen eine wirksame magnetische Abschirmung, so daß deshalb der Leckfluß sehr klein ist.
- 2) sie besitzen einen ausreichend hohen Induktivitätswert.

Jede planare Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung kann mit Hilfe der oben beschriebenen Dünnschichttechnik auf einem Glassubstrat gebildet sein. Alternativ können die Elemente auf einem anderen isolierenden Substrat gebildet werden (zum Beispiel einem Substrat aus einem hochmolekularen Material, zum Beispiel Polyimid).

Die von der spiralförmigen planaren Spule oder den Spulen erzeugten magnetischen Flüsse müssen daran gehindert werden, aus den in Fig. 23 und 24 dargestellten planaren Induktivitäten zu entweichen, weil sonst die Leckflüsse aus den Induktivitäten abträglich die anderen elektronischen Komponenten beeinflussen könnten, die sehr dicht bei der Induktivität auf demselben Chip angeordnet sind, wodurch eine integrierte Hybridschaltung gebildet wird. Gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung ist das Verhältnis zwischen der Breite  $w$  jeder Magnetschicht und der Breite  $a_0$  der quadratischen planaren Spule oder den Spulen möglichst auf einen optimalen Wert eingestellt, damit die von der Spule oder den Spulen erzeugten magnetischen Flüsse an einem Lecken gehindert werden.

Die Fig. 25A bis 25C zeigen Schnittansichten von drei planaren Induktivitäten des in Fig. 23 dargestellten Typs, wobei unterschiedliche Werte  $w$  für die magnetischen Schichten gewählt sind, und wobei verdeutlicht ist, wie die magnetischen Flüsse 100 aus diesen planaren Induktivitäten entweichen. Bei der in Fig. 25A dargestellten Induktivität ist die Breite  $w$  jeder magnetischen Schicht im wesentlichen gleich der Breite  $a_0$  der spiralförmigen Spule 40. Bei der in Fig. 25B gezeigten Induktivität ist die Breite  $w$  etwas größer als die Breite  $a_0$  der Spule 40. Bei der Induktivität nach Fig. 25C ist die Breite  $w$  viel größer als die Breite  $a_0$  der spiralförmigen Spule 40. Wie aus den Fig. 25A, 25B und 25C hervorgeht, sind die Leckflüsse umso kleiner, je breiter jede magnetische Schicht ist.

Fig. 26 ist ein Diagramm, welches die Verteilung der magnetischen Flüsse an den Kanten der spiralförmigen planaren Spule 40 der in Fig. 23 dargestellten Induktivität veranschaulicht. Wie aus Fig. 26 ersichtlich ist, ist das magnetische Feld etwa um das 0,37-fache kleiner an einem Punkt, der von jeder Kante der Spule 40 einen Abstand  $\alpha$  hat, bezogen auf das magnetische Feld an der Kante der Spule 40. Der Abstand  $\alpha$  ist:  $\alpha = (\mu_s g t/2)^{1/2}$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der magnetischen Schichten 30,  $t$  die Schichtdicke und  $g$  der Abstand zwischen den Schichten ist. Damit ist in der planaren Induktivität gemäß Fig. 23 die Breite  $w$  jeder magnetischen Schicht größer um  $2\alpha$  oder mehr, wodurch die Leckflüsse drastisch herabgesetzt werden. Der die Spule 40 bildende Spulenleiter 42 besitzt eine Breite  $d$  von 70  $\mu\text{m}$  und eine Zwischenwindungs-Lücke  $b$  von 10  $\mu\text{m}$ , wobei der Abstand  $g$  zwischen den magnetischen Schichten 5  $\mu\text{m}$  und der Spulenstrom 0,1 A beträgt.

Fig. 27 zeigt die Beziehung zwischen der Breite  $w$  der magnetischen Elemente in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Streuen der Magnetflüsse von der Kante jeder Magnetschicht. Wie aus Fig. 27 ersichtlich ist, ist der Leckfluß umso kleiner, desto größer die Breite  $w$  ist. Es ist wünschenswert, daß die Breite  $w$  den Wert  $a_0 + 10\alpha$  oder mehr aufweist. Wenn die Breite  $w$  den Wert  $a_0 + 10\alpha$  hat, kommen von der planaren Induktivität praktisch keine magnetischen Leckflüsse.

Es wird gefordert, daß die planare Induktivität einen möglichst hohen Induktivitätswert aufweist. Die planare Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung kann nur dann einen hohen Induktivitätswert besitzen, wenn die magnetischen Schichten eine Breite  $w$  haben, die um  $2\alpha$  oder mehr größer ist als die Breite  $a_0$  der planaren Spule. Fig. 28 zeigt die Beziehung zwischen der Breite  $w$  und dem Induktivitätswert der in Fig. 23 dargestellten Spulenordnung. Wie aus Fig. 28 entnehmbar ist, steigt der Induktivitätswert auf das 1,8-fache oder mehr an, wenn die Breite  $w$  von  $a_0$  auf  $a_0 + 2\alpha$  oder mehr erhöht wird.

Im folgenden sollen unter Bezugnahme auf die Fig. 29 bis 48 planare magnetische Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung beschrieben werden. Obschon die beschriebenen Elemente lediglich planare Induktivitäten enthalten, können die planaren magnetischen Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung auch planare Transformatoren enthalten. Jeder planare Transformator, der zu dem vierten Aspekt der Erfindung gehört, ist in der Struktur im wesentlichen gleich der planaren Spulenordnung, mit der Ausnahme, daß die Primärspule und die Sekundärspule übereinander angeordnet sind.

Fig. 29 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer ersten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung. Wie aus Fig. 29 ersichtlich ist, enthält diese Induktivität zwei magnetische Schichten 30, zwei Isolierschichten 20 und eine spiralförmige planare Spule 40, die zwischen den Isolierschichten 20 sandwich-

artig eingefäbt ist. Die aus den Schichten 20 und der Spule 40 gebildete Einheit ist sandwichartig zwischen den magnetischen Schicht n 30 eingefäbt. Die magnetischen Schichten 30 weisen eine uniaxiale magnetische Anisotropie auf. Sie besitzen eine Achse leichter Magnetisierung, die durch einen Pfeil angedeutet ist.

Wenn durch die spiralförmige planare Spule 40 ein Strom fließt, erzeugt die Spule 40 ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld erstreckt sich durch jede Magnetschicht 30 in vier Richtungen, die in Fig. 30 durch Pfeile angedeutet sind. In der Zone A in Fig. 30 erstreckt sich das Magnetfeld in Linien parallel zur Achse der leichten Magnetisierung der magnetischen Schicht 30. In den Zonen B verläuft das Magnetfeld in Linien, welche die Achse der leichten Magnetisierung schneiden, oder parallel zu der Achse der schweren Magnetisierung der magnetischen Schicht sind.

Fig. 31 zeigt eine B-H-Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung für beide Schichten 30 in der in Fig. 29 gezeigten Induktivität, außerdem eine B-H-Magnetisierungskurve in der Achse schwerer Magnetisierung der Magnetschicht. Wie aus Fig. 31 ersichtlich ist, zeigt die magnetische Schicht eine sehr hohe Permeabilität in der Achse leichter Magnetisierung und kann mithin in der Achse leichter Magnetisierung gesättigt werden, und kann in der Achse schwerer Magnetisierung kaum gesättigt werden. Daraus folgt, daß die Zonen A (Fig. 30) leicht magnetisch gesättigt werden können, wohingegen die Zonen B (Fig. 30) schwer magnetisch zu sättigen sind. Wenn das von der Spule 40 erzeugte Magnetfeld stark ist, sind die Zonen A jeder magnetischen Schicht 30 gesättigt, und aus der Schicht 30 erfolgt ein gewisser magnetischer Leckfluß, wie in Fig. 32A angedeutet ist. Die übrigen magnetischen Flüsse verlaufen durch die Zonen B (Fig. 30), wie aus Fig. 32B ersichtlich ist. Offensichtlich hängt der Induktivitätswert dieser planaren Induktivität ab von der Dichte der Magnetflüsse, die entlang der Achse schwerer Magnetisierung in jeder Magnetschicht 30 verlaufen.

Um das Problem der Sättigung der magnetischen Schichten zu lösen, besitzen die planaren Induktivitäten gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung eine der folgenden drei Strukturen:

#### Erste Struktur

Zwei Gruppen von magnetischen Schichten werden unterhalb und oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule angeordnet. Die magnetischen Schichten jeder Gruppe sind derart übereinander angeordnet, daß sich ihre Achsen leichter Magnetisierung schneiden.

#### Zweite Struktur

Unterhalb und oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule befindet sich jeweils eine quadratische magnetische Schicht. Jede Schicht besteht aus vier dreieckigen Stücken, von denen jeweils eine Achse leichter Magnetisierung sich parallel zu der Unterlage erstreckt.

#### Dritte Struktur

Zwei magnetische Schichten befinden sich beziehungsweise oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule. Jede Magnetschicht besitzt eine spiralförmige Nut, die sich exakt entlang dem spiralförmigen Leiter der Spule erstreckt.

Fig. 33 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität mit der oben erwähnten ersten Struktur. Wie aus Fig. 33 ersichtlich ist, besitzt diese Induktivität zwei Schichtanordnungen oder Lamine, und zwischen den Laminaten ist sandwichartig eine spiralförmige planare Spule 40 angeordnet. Die Lamine haben identischen Aufbau.

Jedes Laminat besitzt zwei Isolierschichten 20A und 20B und zwei magnetische Schichten 30A und 30B. Die Isolierschicht 20A ist an der Spule 40, die magnetische Schicht 30A ist an der Schicht 20A, die Isolierschicht 20B ist an der magnetischen Schicht 30A und die magnetische Schicht 30B ist an der Isolierschicht 20B angeordnet. Die magnetischen Schichten 30A und 30B sind derart angeordnet, daß sich ihre Achsen (Pfeile) leichter Magnetisierung unter rechten Winkeln schneiden.

In jedem Laminat sind diejenigen Zonen der magnetischen Schicht 30A, die sich in der Nähe der Spule 40 befinden, die der Zone A in Fig. 30 entspricht, magnetisch leicht gesättigt, und aus diesen gesättigten Zonen dringt ein gewisser magnetischer Leckfluß. Diese Leckflüsse erstrecken sich durch solche Zonen der magnetischen Schicht 30B, die den Zonen B in Fig. 30 entsprechen. Im Ergebnis erstrecken sich die magnetischen Flüsse entlang den Achsen schwerer Magnetisierung in beiden magnetischen Schichten 30A und 30B, und in jeder Magnetschicht kann kaum eine magnetische Sättigung eintreten.

Fig. 34 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität. Die ausgezogene Linie zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, wohingegen die unterbrochene Kurve die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 29 dargestellten planaren Induktivität veranschaulicht. Wie aus Fig. 34 ersichtlich ist, ist der Induktivitätswert der in Fig. 34 dargestellten Induktivität, die zwei Sätze von magnetischen Schichten besitzt, zweimal so hoch wie der der in Fig. 29 gezeigten Induktivität, die lediglich einen Satz magnetischer Schichten besitzt. Weiterhin zeigt Fig. 34 deutlich, daß der Gleichstrom, bei dem der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 33 abzufallen beginnt, größer ist als der Gleichstrom, bei dem der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 29 abzufallen beginnt.

Fig. 35 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer modifizierten Form der Induktivität gemäß Fig. 33. Diese planare Induktivität unterscheidet sich von derjenigen nach Fig. 33 dadurch, daß jedes Laminat vier magnetische Schichten 30A, 30B, 30C und 30D enthält. Die vier magnetischen Schichten jedes Laminats sind so angeordnet, daß die Achsen leichter Magnetisierung von jeweils benachbarten Schichten sich unter rechten Winkeln schneiden.



Im folgenden soll kurz erläutert werden, wie die Induktivität n gemäß den Fig. 33 und 35 hergestellt werden. Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder einem Oxid mit einer Dicke von 3 µm oder mehr vorbereitet. Dann werden die magnetischen Schichten bearbeitet, um ihnen eine uniaxiale magnetische Anisotropie zu verleihen. Die magnetischen Schichten werden derart orientiert, daß die Achsen leichter Magnetisierung von jeweils zwei benachbarten Schichten sich im rechten Winkel schneiden. Zwischen die so orientierten magnetischen Schichten werden Isolierschichten gelegt. Zwischen die beiden innersten Isolierschichten wird eine planare Spule eingelegt. Schließlich werden die Spule, die magnetischen Schichten und die Isolierschichten sämtlich übereinandergelegt, um zusammengepreßt zu werden.

Die magnetischen Schichten können mittels Dünnschichttechnik, beispielsweise Aufdampfen oder Zerstäuben, hergestellt werden. Werden sie in Dünnschichttechnik hergestellt, so erhalten sie die uniaxiale magnetische Anisotropie, während sie in einem elektrostatischen Feld gebildet werden, oder während sie einer Wärmebehandlung in einem Magnetfeld unterzogen werden. Je geringer die Magnetostriction, desto besser. Nichtsdestoweniger kann eine magnetische Schicht, wenn sie aus einem Material mit relativ großer Magnetostriction hergestellt wird, eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufgrund des inversen Magnetostrictionseffekts nur dann erhalten, wenn die Spannungsverteilung in der Schicht geeignet gesteuert wird.

Fig. 36 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität, die die oben erwähnte zweite Struktur besitzt. Wie aus Fig. 36 ersichtlich ist, enthält diese Induktivität zwei Isolierschichten 20, zwei quadratische magnetische Schichten 30 und eine spiralförmige planare Spule 40, die sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20 aufgenommen wird. Die aus den Schichten 20 und der Spule 40 bestehende Einheit wird sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30 aufgenommen. Jede magnetische Schicht 30 besteht aus vier dreieckförmigen Stücken, jeweils mit einer Achse der leichten Magnetisierung parallel zu der Grundlinie. Die Achse der leichten Magnetisierung in jedem der dreieckigen Stücke schneidet unter rechtem Winkel die von der Spule 40 erzeugten Magnetflüsse. Deshalb besitzen die magnetischen Schichten 30 keine Zonen, in denen sie leicht magnetisch in Sättigung gehen.

Fig. 37 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie für die in Fig. 36 gezeigte Induktivität. Die ausgezogene Kurve zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, während die gestrichelte Linie die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität gemäß Fig. 29 veranschaulicht. Aus Fig. 34 ist ersichtlich, daß der Induktivitätswert der Induktivität nach Fig. 29 in der Zone geringen Stroms sehr hoch ist, jedoch mit dem Überlagerungs-Gleichstrom abrupt abnimmt und anschließend praktisch konstant bleibt, bis der Überlagerungs-Gleichstrom bis auf einen spezifischen Wert zunimmt. Der Induktivitätswert der Induktivität nach Fig. 36 hingegen, bei der die Magnetschichten keine Zonen besitzen, die relativ leicht in Sättigung gehen, ist etwa zweimal höher als bei der Induktivität nach Fig. 29, und bleibt praktisch ungeachtet des Überlagerungs-Gleichstroms konstant, bis letzterer auf einen spezifischen Wert ansteigt.

Die in Fig. 36 dargestellte planare Induktivität wird folgendermaßen hergestellt: Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder Oxid mit einer Dicke von 3 µm oder mehr vorbereitet. Diese Schichten werden zu dreieckigen Stücken geschnitten, die jeweils in der Grundlinie länger sind als die Breite der spiralförmigen Spule 40. Die dreieckigen Stücke werden in einem Magnetfeld, welches parallel zu den Grundlinien der dreieckigen Stücke verläuft, wärmebehandelt. Im Ergebnis erhält jedes Stück eine Achse leichter Magnetisierung, die sich parallel zu der Grundlinie erstreckt. Vier solche dreieckigen Stücke, die nun eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufweisen, werden miteinander derart verbunden, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich parallel zu dem spiralförmigen Leiter der planaren Spule 40 erstrecken.

Alternativ können die magnetischen Schichten 30 mittels Dünnschichttechnik ausgebildet werden, zum Beispiel mittels Aufdampfen oder Zerstäuben. Werden sie mittels Dünnschichttechnik gebildet, so benutzt man dreieckige Masken zur Bildung der dreieckigen Stücke. Speziell werden zwei dreieckige Resistmaterial-Masken auf zwei dreieckigen Zonen B eines quadratischen Substrats gebildet. Dann wird auf dem Substrat und auf den Masken eine magnetische Schicht mit vorbestimmter Dicke gebildet, während ein Magnetfeld parallel zu den Grundlinien der Zonen A angelegt wird. Als nächstes werden die Masken von dem Substrat entfernt, und die magnetischen Schichten auf diesen Masken werden gleichzeitig mit abgehoben. Im Ergebnis werden zwei dreieckige magnetische Stücke in den Zonen A des Substrats gebildet, und die dreieckigen Zonen B des Substrats liegen frei. Dann werden zwei dreieckige Resist-Masken auf den dreieckigen Magnetstücken (an den Zonen A) gebildet. Auf den freiliegenden Zonen B und auch auf den Masken wird mit der vorbestimmten Dicke eine magnetische Schicht gebildet, während ein Magnetfeld parallel zu den Zonen B angelegt wird. Danach werden die Masken von den dreieckigen Magnetstücken aus den Zonen A entfernt, und gleichzeitig damit werden die Resist-Masken abgelöst. Damit sind in den Zonen B zwei dreieckige magnetische Stücke gebildet.

Fig. 38 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität, die die dritte oben erläuterte Struktur besitzt. Wie aus Fig. 38 hervorgeht, umfaßt diese Induktivität ein Substrat 10, zwei Isolierschichten 20, zwei quadratische magnetische Schichten 30 und eine spiralförmige planare Spule 40, die zwischen den Isolierschichten 20 sandwichartig eingefügt ist. Die durch die Schichten 20 und die Spule 40 gebildete Einheit ist sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30 eingefügt, von denen die untere auf dem Substrat 10 liegt. Jede magnetische Schicht 30 besitzt eine spiralförmige Nut, die sich exakt entlang dem spiralförmigen Leiter der Spule 40 erstreckt. Wegen dieser spiralförmigen Nut besitzen die vier dreieckigen Zonen der magnetischen Schicht 3 Achsen leichter Magnetisierung, die von der spiralförmigen Spule 40 erzeugte Magnetflüsse rechtwinklig schneiden. Damit besitzt keine der Magnetschichten 30 Zonen, die leicht in magnetische Sättigung gelangen.

Die in Fig. 38 gezeigten magnetischen Schichten, die mit einer Spiralnute versehen sind, können nach zwei Verfahren hergestellt werden. Bei dem ersten Verfahren wird in der Oberfläche einer Unterlagenplatte eine



Spiralnute gebildet, entweder durch spanabhebende Bearbeitung oder durch Fotolithografie, und auf der Nutfläche der Unterlagenplatte wird eine dünne magnetische Schicht aufgebracht. Bei dem zweiten Verfahren wird eine relativ dicke magnetische Schicht gebildet, und anschließend wird in die Oberfläche der magnetischen Schicht eine Spiralnute eingearbeitet, entweder durch spanabhebende Bearbeitung oder durch Fotolithografie.

Im folgenden soll kurz erklärt werden, warum eine magnetische Schicht magnetische Anisotropie zeigt, wenn in ihre Oberfläche eine Spiralnute eingeschnitten wird. Eine ferromagnetische Schicht besitzt mehrere magnetische Domänen. Eine sehr dünne ferromagnetische Schicht besitzt keine Domänenwand, sondern besitzt eine in Dickenrichtung orientierte magnetische Domäne. Wie aus dem Stand der Technik bekannt ist, haben die magnetischen Momente der magnetischen Domäne den gleichen Betrag und die gleiche Richtung.

Wenn in die Oberfläche der dünnen ferromagnetischen Schicht eine Nut eingeschnitten wird, entstehen magnetische Pole, wodurch ein Endmagnetisierungsfeld oder ein magnetisches Streufeld erzeugt wird. Das so erzeugte magnetische Feld wirkt auf die magnetischen Momente innerhalb der ferromagnetischen Schicht ein und verleiht dieser magnetische Anisotropie. In derselben Weise erhalten dicke magnetische Schichten magnetische Anisotropie, wenn in ihre Oberflächen eine Nut eingearbeitet wird.

Es ist wünschenswert, daß die in der Oberfläche jeder magnetischen Schicht 30 gebildete Spiralnute spezielle Bedingungen erfüllt, die im folgenden anhand der Fig. 39 erläutert werden.

Wie in Fig. 39 zu sehen ist, besitzt die Oberfläche jeder magnetischen Schicht 30 parallele Nuten und parallele Streifen, die alternierend Seite an Seite angeordnet sind. Jeder Streifen besitzt eine Breite  $L$  und eine Höhe  $W$ . Jede Nut hat eine Breite  $\delta$ . Die magnetische Schicht besitzt eine Dicke  $d$ , gemessen vom Boden der Nut aus. Die dreidimensionalen Koordinaten, welche die Position des  $i$ -ten magnetischen Streifens angeben, lauten:

$$\begin{aligned} x: (L + \delta)(i-1) - L/2 \leq x \leq (L + \delta)(i-1) + L/2 \\ y: -\infty < y < +\infty \\ z: -w/2 \leq z \leq +w/2 \quad (1) \end{aligned}$$

Diese Beziehungen repräsentieren eine Oberflächenstruktur, die aus einer definierten Anzahl paralleler Streifen und Nuten besteht, die in X-Achsen-Richtung Seite an Seite angeordnet sind und sich in y-Achsen-Richtung in nicht definierter Weite erstrecken. Die Relationen bedeuten auch, daß der Magnetisierungsvektor  $I$  sich parallel zu der magnetischen Schicht erstreckt, wenn die Schicht eine niedrige magnetische Anisotropie besitzt. Wenn nicht der  $\cos \Theta$  des Vektors  $I$  bezüglich der X-Achse 0 ist, ergeben sich magnetische Pole in der Y-Z-Ebene der magnetischen Schicht. Die Oberflächendichte dieser Pole ist das Produkt aus  $I$  und  $\cos \Theta$ . Das Magnetfeld, welches diese Pole erzeugen, kann analytisch definiert werden als eine Funktion der Koordinaten  $(x, z)$ . Es sei als Beispiel der Magnetstreifen ( $i = 0$ ) betrachtet. Das Endmagnetisierungsfeld  $H_d$ , welches an diesen Magnetstreifen angelegt wird, und das wirksame Magnetfeld  $H_m$ , welches von irgendeinem anderen Magnetstreifen an den Streifen gelegt wird, werden folgendermaßen dargestellt:

$$H_d = \frac{-I \cos \Theta_1}{\mu_0} \left[ \ln \frac{\cos \Theta_{0,2} \times \cos \Theta_{0,3}}{\cos \Theta_{0,1} \times \cos \Theta_{0,4}} \right] \times \frac{1}{2\pi}$$

$$H_m = \frac{-I}{\mu_0} \sum_{k=0}^{\infty} \cos \Phi_k \left[ \ln \frac{\cos \Theta_{0,2} \times \cos \Theta_{0,3}}{\cos \Theta_{0,1} \times \cos \Theta_{0,4}} \right] \times \frac{1}{2\pi}$$

$$\Theta_{0,k} = \tan^{-1} \frac{z + (-1)^k \cdot \frac{w}{2}}{x - j(\delta + L) + \frac{L}{2} \times \sin \left( \frac{\pi}{2} k - \frac{\pi}{4} \right)}, \quad (2)$$

wobei  $\Theta_{0,k}$  ist:

Es sei angenommen, daß die statische Energie der Felder  $H_d$  und  $H_m$  als eine Funktion von  $D$  betrachtet werden kann, während sich außerdem der Magnetstreifen ( $i = 0$ ) in einem stabilen Zustand befindet. Dann wird die durchschnittliche Differenz der Energiedichte  $U_k$  pro Flächeneinheit, die durch  $D = 0$  (der Vektor  $I$  ist parallel zu dem Streifen) und  $D = 1/2$  (der Vektor  $I$  ist senkrecht zu dem Streifen) definiert ist, folgendermaßen dargestellt:

$$\begin{aligned}
 U_k &= v \times \frac{I^2}{\mu_0} \times \left\{ \frac{1}{2} N_{eff} - 2 \sum_{i=1}^{\infty} P_{eff,i} \right\} \\
 N_{eff} &= \frac{2}{\pi L W} \int_0^W d\xi \int_0^L d\eta \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{\xi}{\eta} \right) \right\} \\
 P_{eff,i} &= \frac{-1}{\pi L W} \int_0^W d\xi \int_{(i\delta+L)}^{(i\delta+L)+L} d\eta \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{\xi}{\eta} \right) - \tan^{-1} \frac{\xi}{\eta-1} \right\}
 \end{aligned}$$

Wie daraus ersichtlich ist, besteht die Möglichkeit, magnetische Schichten magnetisch anisotrop zu machen, indem man lediglich in der Oberfläche der magnetischen Schicht eine spiralförmige Nut ausbildet. Um die y-Achse als Achse leichter Magnetisierung zu erhalten, ist es jedoch erforderlich, daß die Achse (entweder  $X = 0$  oder  $Y = 0$ ) jedes magnetischen Streifens eine Achse leichter Magnetisierung ist. Betrachtet man ( $X = 0, Y = 0$ ) in Verbindung mit der Gleichung für  $U_k$  und berücksichtigt  $i = \pm 1$ , so ändert sich die Gleichung für  $U_k$  folgendermaßen:

$$U_k = \frac{v I^2}{\pi \mu_0} \cdot \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{W}{L} \right) - 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+L} \right) + 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+3L} \right) \right\} \quad (4)$$

Der erste Term der Gleichung (4) ist stets positiv. Ob also  $U_k$  einen positiven oder einen negativen Wert hat, hängt davon ab, ob der zweite Term positiv oder negativ ist. Deshalb kann die magnetische Schicht eine Achse leichter Magnetisierung haben, die sich parallel zu den Magnetstreifen und Nuten erstreckt, und sie kann eine Achse schwerer Magnetisierung aufweisen, die sich rechtwinklig zu den Streifen und Nuten erstreckt, vorausgesetzt, daß die Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht folgende Ungleichung erfüllt:

$$\tan^{-1} \left( \frac{W}{L} \right) \geq 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+L} \right) - 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+3L} \right) \quad (5)$$

Fig. 40 zeigt die Beziehung zwischen den Parametern der Oberflächenstruktur jeder Magnetschicht der Induktivität (Fig. 38) und dem zweiten Term der Gleichung für  $U_k$ . Wie aus Fig. 40 ersichtlich ist, wird die magnetische Anisotropie umgekehrt, wenn die Höhe  $W$  der Streifen so klein ist wie in dem Fall, in welchem  $\delta/L = 1/16$ . Dann ist es möglich, daß die magnetische Schicht eine Achse leichter Magnetisierung besitzt, die sich rechtwinklig zu den Streifen und Nuten erstreckt.

Im Fall  $W = 0,5 \mu\text{m}$ ,  $L = 4 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und  $d = 2 \mu\text{m}$ , beträgt die durchschnittliche Energiedifferenz-Dichte  $U_k$  für den nächstliegenden Streifen ( $i = \pm 1$ ) 80 Oe oder mehr, ausgedrückt in der Stärke eines anisotropen Magnetfeldes und beruhend auf der Annahme, daß der Magnetisierungswert 1T beträgt.

Fig. 41 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität gemäß Fig. 38. Genauer gesagt: Die ausgezogene Kurve zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, während die gestrichelte Linie die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität gemäß Fig. 29 veranschaulicht. Wie aus Fig. 41 ersichtlich ist, ist im Gegensatz zu dem Induktivitätswert der in Fig. 29 gezeigten Induktivität der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 38 praktisch konstant, ungeachtet des überlagerten Gleichstroms, bis der Überlagerungs-Gleichstrom auf einen spezifischen Wert zugenommen hat.

Wie oben erläutert, sind die planaren Induktivitäten gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung frei von dem Problem der Sättigung der magnetischen Schichten, da diese die ersten, die zweite oder die dritte der oben beschriebenen Strukturen aufweisen und mithin die Schichten in ihren jeweiligen Achsen schwerer Magnetisierung magnetisiert sind. Da weiterhin jede magnetische Schicht in ihrer Achse schwerer Magnetisierung magnetisiert ist, unterliegt sie einer Drehmagnetisierung. Daher läßt sich der durch hochfrequenten Wirbelstrom bedingte Verlust stärker reduzieren, als in dem Fall, in welchem jede magnetische Schicht einer Bewegung der Magnetdomänen-Wand unterliegt. Offensichtlich trägt dies bei zur Verbesserung des Frequenzgangs der planaren Induktivität.

Im folgenden werden verschiedene spiralförmige planare Spulen erläutert, die rechtwinklig und nicht quadratisch, wie die bisher beschriebenen Spulen sind, die in den planaren magnetischen Elementen gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung verwendet werden. Wie beschrieben werden wird, sind die Anschlüsse jeder rechtwinkligen planaren Spule leichter nach außen zu führen als bei den quadratischen planaren Spulen.

Hier werden verschiedene planare Induktivitäten, jeweils mit mindestens einer rechtwinkligen spiralförmigen planaren Spule, als planare magnetische Elemente beschrieben. Nicht nur solche planare Induktivitäten, sondern auch planare Transformatoren sind von den planaren magnetischen Elementen gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung umfaßt. Diese planaren Transformatoren sind im Aufbau identisch mit den planaren Induktivitäten, mit der Ausnahme, daß sie eine Primärspule und eine Sekundärspule besitzen, die beide rechtwinklige spiralförmige planare Spulen in einer Anordnung übereinander sind, wobei die gleichen Vorteile wie bei den planaren Induktivitäten erzielt werden. Deshalb sollen die planaren Transformatoren nicht im Detail erläutert werden.

Fig. 42A zeigt die Magnetisierungskennlinie einer magnetischen Schicht mit uniaxialer magnetischer Anisotropie. Die Fig. zeigt die B-H-Magnetisierungskurve entlang der Achse einfacher Magnetisierung, außerdem die

B-H-Magnetisierungskurve entlang der Achse schwerer Magnetisierung. Fig. 42B zeigt die Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz, welche die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung zeigt, außerdem zeigt die Fig. die Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz entlang der Achse schwerer Magnetisierung. Wie aus Fig. 42B ersichtlich ist, ist die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung ganz sättigbar, kann jedoch entlang der Achse schwerer Magnetisierung kaum gesättigt werden. Wie ohne weiteres aus Fig. 42B ersichtlich ist, ist die Permeabilität, welche die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung zeigt, im niedrigen Frequenzbereich sehr hoch, ist hingegen im Hochfrequenzbereich sehr niedrig. Im Gegensatz dazu ist die Permeabilität, die die Schicht entlang der Achse schwerer Magnetisierung aufweist, im niedrigen Frequenzbereich geringer als die Permeabilität entlang der Achse leichter Magnetisierung, ist jedoch im Hochfrequenzbereich wesentlich höher. Die grafischen Darstellungen in den Fig. 42A und 42B ergeben, daß eine planare Induktivität mit guten elektrischen Eigenschaften hergestellt werden kann, wenn man Gebrauch macht von der konstanten Permeabilität, welche die magnetische Schicht entlang der Achse schwerer Magnetisierung aufweist.

Es gibt drei Arten der Ausnutzung der konstanten Permeabilität der magnetischen Schicht. Diese Arten werden im folgenden einzeln erläutert.

#### Erste Art

Die erste Art besteht darin, eine rechtwinklige spiralförmige planare Spule, zwei die Spule einschließende Isolierschichten und zwei oberhalb und unterhalb der Spule angeordnete magnetische Schichten derart zu verwenden, daß die Achsen schwerer Magnetisierung der magnetischen Schichten mit der Hauptachse der Spule ausgerichtet sind.

Fig. 43A ist eine Draufsicht auf eine planare Induktivität, die nach dem ersten Verfahren hergestellt ist. Fig. 43B ist eine Schnittansicht dieser Induktivität entlang der Linie 43B-43B in Fig. 43A. Wie aus diesen Fig. 43A und 43B hervorgeht, ist eine rechtwinklige, spiralförmige planare Spule 40 zwischen zwei magnetischen Schichten 30 sandwichartig eingefaßt. Die Spule hat ein großes geometrisches Verhältnis (das heißt das Verhältnis der Länge  $m$  der Hauptachse zu der Länge  $n$  der Nebenachse). Je größer das geometrische Verhältnis  $m/n$  ist, desto mehr schneiden von der Spule 40 erzeugte Magnetflüsse rechtwinklig die Achsen der leichten Magnetisierung der magnetischen Schicht, wodurch die elektrischen Eigenschaften der planaren Induktivität verbessert werden. Um die Kennlinien der Induktivität weiter zu verbessern, können die magnetischen Schichten 30 derart verkleinert werden, daß sie lediglich den Mittelabschnitt der Spule 40 abdecken, wie dies in Fig. 44 dargestellt ist.

#### Zweite Art

Die zweite Art ist die, daß zwei rechtwinklige, spiralförmige planare Spulen desselben Typs wie bei der ersten Art hergenommen und in derselben Ebene angeordnet werden, wobei zwei Isolatoren, welche die Spulen sandwichartig einschließen, und zwei Sätze von magnetischen Schichten verwendet werden, jeder Satz bestehend aus zwei übereinanderliegenden magnetischen Schichten über und unter der zugehörigen Spule. Die magnetischen Schichten jedes Satzes sind so angeordnet, daß ihre Magnetisierungsachsen mit der Hauptachse der entsprechenden Spule ausgerichtet sind.

Fig. 45 ist eine Draufsicht auf eine planare Induktivität der zweiten Art, die zwei rechtwinklige, spiralförmige Spulen 40 aufweist, die mit ihren Enden verbunden und entlang ihren Hauptachsen ausgerichtet sind. Diese planare Induktivität besitzt den gleichen Querschnittaufbau wie die Induktivität gemäß Fig. 43B.

Fig. 46A ist eine Draufsicht auf eine weitere planare Induktivität der zweiten Art, die zwei rechtwinklige, spiralförmige Spulen 40 enthält, die Seite an Seite liegend miteinander verbunden sind, wobei ihre Nebenachsen miteinander ausgerichtet sind. Fig. 46B ist eine Schnittansicht entlang der Linie 46B-46B in Fig. 46A, die diese planare Induktivität veranschaulicht.

Es gibt zwei alternative Verfahren zum Verbinden der Spulen 40 Seite an Seite. Nach dem ersten Verfahren werden die Spulen 40 mit ihren in derselben Richtung gewickelten Leitern in der in Fig. 46A dargestellten Weise angeordnet und dann Seite an Seite miteinander verbunden. Bei dem zweiten Verfahren werden die Spulen 40 so angeordnet, daß ihre Leiter in entgegengesetzte Richtungen gewickelt sind, wie aus Fig. 47A ersichtlich ist, und anschließend werden sie miteinander Seite an Seite verbunden. Wird vom zweiten Verfahren Gebrauch gemacht, so werden mehr magnetische Wege gebildet, als im Fall des ersten Verfahrens, wie aus Fig. 47B ersichtlich ist. Welches Verfahren vorzuziehen ist, hängt von verschiedenen Bedingungen für die planare Induktivität ab.

Bei den planaren Induktivitäten gemäß den Fig. 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B ist es möglich, größere magnetische Schichten zu verwenden, die die gesamten Spiralspulen 40 bedecken, nicht nur deren mittlere Abschnitte, wie dies in den Fig. 44, 45, 46A und 47A gezeigt ist.

#### Dritte Art

Bei der dritten Art werden die Anschlüsse des Leiters miteinander verbundener rechtwinkliger planarer Spulen freigelegt. Dies erleichtert das Herausführen der Anschlüsse aus der planaren Induktivität.

Wie beschrieben, werden in den planaren Induktivitäten der ersten, der zweiten und der dritten Art zwei rechtwinklige Spiralspulen miteinander verbunden. Daher kann ihr Induktivitätswert zwei- oder mehrfach höher sein als bei der in den Fig. 43A und 43B sowie in Fig. 45 dargestellten Induktivität. Da außerdem die beiden rechtwinkligen Spiralspulen in derselben Ebene liegen, sind keine freiliegenden Drähte für die elektrische Verbindung erforderlich.

Wie aus der Beschreibung hervorgeht, machen die planaren magnetischen Element gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung wirksamen Gebrauch von der Achse schwerer Magnetisierung jeder in der Induktivität enthaltenen magnetischen Schicht. Die magnetische Schicht erfährt eine Drehmagnetisierung und wird kaum magnetisch gesättigt, so daß dadurch das Hochfrequenzverhalten des planaren magnetischen Elements verbessert wird.

Bei den planaren Induktivitäten gemäß den Fig. 44, 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B ist lediglich eine magnetisch anisotrope Schicht an jeder Seite der spiralförmigen Spule angeordnet. In der Praxis befinden sich zwei oder noch mehr magnetisch anisotrope Schichten an jeder Seite der Spule, so daß ein hoher Induktivitätswert erreicht wird.

Es soll kurz erläutert werden, wie die planaren Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung hergestellt werden. Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder einem Oxid mit einer Dicke von 3 µm oder darüber vorbereitet. Diese magnetischen Schichten werden in einem Magnetfeld wärmebehandelt, wodurch sie eine uniaxiale magnetische Anisotropie annehmen. Dann werden die nun magnetisch anisotropen magnetischen Schichten, eine gewünschte Anzahl rechtwinkliger Spiralspulen und Isolierschichten übereinander gestapelt und miteinander verbunden. Es ist wünschenswert, daß die magnetischen Schichten aus einem solchen Material bestehen, daß die Schichten möglichst wenig Spannung ausgesetzt sind, wenn sie mit den Spulen und den Isolierschichten verbunden werden.

Die magnetischen Schichten können in Dünnschichttechnik, zum Beispiel durch Aufdampfen oder Zerstäuben, hergestellt werden.

Werden sie in Dünnschichttechnik hergestellt, so erhalten sie die uniaxiale magnetische Anisotropie, während sie in einem elektrostatischen Feld ausgebildet werden, oder während sie einer Wärmebehandlung in einem Magnetfeld unterzogen werden. Je geringer die Magnetostraktion, desto besser. Nichtsdestoweniger kann eine magnetische Schicht, die aus einem Material mit relativ hoher Magnetostraktion hergestellt wird, eine uniaxiale magnetische Anisotropie durch den inversen Magnetostraktionseffekt erhalten, wenn nur die Spannungsverteilung in der Schicht geeignet gesteuert wird.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung werden modifiziert, so daß man sie in integrierte Schaltungen einbauen kann, zusammen mit anderen Elementen wie Transistoren, Widerständen und Kondensatoren. Speziell werden die Elemente so modifiziert, daß ihre magnetischen Leckflüsse reduziert werden, um ein Versagen der anderen Elemente zu unterbinden. Die planaren Induktivitäten nach den Fig. 44, 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B brauchen speziell zusätzliche Elemente, das heißt magnetische Abschirmungen, welche die freiliegenden Teile der Spulenleiter abdecken. Eine solche modifizierte Form soll nun unter Bezugnahme auf die Fig. 48A und 48B erläutert werden, die eine Draufsicht beziehungsweise Schnittansicht zeigen.

Diese modifizierte Form ist gekennzeichnet durch die Verwendung von zwei magnetischen Abschirmungen 32, welche die magnetischen Schichten 30 und außerdem eine rechtwinklige Spiralspule 40 in ihrer Gesamtheit abdecken. Damit sperren die Abschirmungen 32 magnetische Flüsse ab, die aus der Spule 40 herauskommen. In den Fig. 48A und 48B sind für gleiche Teile wie in den Fig. 43A und 43B gleiche Bezugszeichen verwendet.

Im folgenden werden anhand der Fig. 49 bis 61 planare magnetische Elemente gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung beschrieben.

Fig. 49 und 50 sind Draufsichten auf zwei planare Spulen zur Verwendung in planaren magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung.

Die in Fig. 49 dargestellte Spule ist etwa quadratisch, liegt zwischen einem Paar magnetischer Schichten 30 und enthält mehrere Einzelwindungs-Spulenleiter 40. Die Leiter 40 sind in derselben Ebene konzentrisch zueinander angeordnet. Jeder Leiter 40 besitzt zwei Anschlüsse 40, die sich von einer Seite der kombinierten magnetischen Schichten 30 aus erstrecken.

Auch die in Fig. 50 gezeigte Spule ist etwa quadratisch und liegt zwischen einem Paar magnetischer Schichten 30. Sie enthält mehrere Einzelwindungs-Spulenleiter 40, die in einer Ebene konzentrisch zueinander angeordnet sind. Jeder Leiter 40 besteht aus zwei Abschnitten, die symmetrisch zueinander ausgebildet sind. Jeder Abschnitt besitzt zwei Anschlüsse, die von den beiden entgegengesetzten Seiten der kombinierten Magnetschichten 30 abstehen. Damit besitzt jeder Einzelwindungs-Spulenleiter 40 vier Anschlüsse, von denen zwei auf einer Seite der kombinierten magnetischen Schichten 30 abstehen, während die verbleibenden zwei von der entgegengesetzten Seite der Magnetschichten 30 abstehen.

In den planaren magnetischen Elementen gemäß den Fig. 49 und 50 können die magnetischen Schichten 30 aus einem weichen Ferritkern, einem weichen Magnetband, einer magnetischen Dünnschicht oder dergleichen bestehen. Wenn Sie aus einem Band aus einer weichmagnetischen Legierung oder einer Schicht aus einer weichmagnetischen Legierung bestehen, ist es nötig, eine Isolierschicht in die Lücke zwischen der planaren Spule und jeder Magnetschicht 30 einzufügen.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung benötigen keine Durchkontaktierung oder Anschluß-Leiter, wie das magnetische Element, das spiralförmige planare Spulen besitzt. Deshalb lassen sie sich einfach herstellen. Weiterhin können sie leicht an externe Schaltungen angeschlossen werden, da die Anschlüsse jeder Einzelwindungs-Spule 40 sich von der Seite oder den Seiten der Magnetschichten 30 aus erstrecken.

Wenn irgendein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung als ein Induktivitätselement verwendet wird, so läßt sich dessen Induktivitätswert leicht dadurch einstellen, daß man die Einzelwindungs-Spulen 40 in verschiedener Weise miteinander verbindet, wie im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 51 bis 53 erläutert wird.

Fig. 51 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 gezeigten Typs. Sämtliche Einzelwindungs-Spulen 40 dieser planaren Spule sind mit ihren Enden verbunden, ausgenommen die am weitesten innen liegende Einzelwindungs-

Spule und die äußerste Spule. Das freie Ende der innersten Einzelwindungs-Spule 40 bildet einen Eingangsanschluß der planaren Spule, während das freie Ende der äußersten Einzelwindungs-Spule den anderen Anschluß der planaren Spule bildet. Die durch die so miteinander verschalteten Spulen 40 gebildete planare Spule erzeugt ein Magnetfeld, welches demjenigen ähnelt, das von einer planaren Spule mit einem mäanderförmigen Spulenleiter erzeugt wird.

Fig. 52 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 dargestellten Typs. Ein Ende jeder Einzelwindungs-Spule 40 ist mit demjenigen Ende der nächsten Spule 40 verbunden, das bezüglich der vertikalen Achse in Fig. 52 symmetrisch liegt. Das zweite Ende der innersten Einzelwindungs-Spule ist frei, ebenso wie das zweite Ende der äußersten Einzelwindungs-Spule. Bei dieser planaren Spule fließt der Strom in einer Richtung durch jede Einzelwindungs-Spule. Diese planare Spule erzeugt ein Magnetfeld, welches ähnlich dem Magnetfeld ist, das von einer planaren Spule erzeugt wird, die einen spiralförmigen Spulenleiter besitzt.

Fig. 53 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 gezeigten Typs.

Einige äußere Einzelwindungsspulen 40 dieser planaren Spule sind mit ihren Enden verbunden, ausgenommen die äußerste Einzelwindungsspule, während die übrigen Einzelwindungsspulen 40, das heißt die inneren Einzelwindungsspulen, mit ihren Enden an das Ende der nächsten Einzelwindungsspule 40 angeschlossen sind, das symmetrisch bezüglich der vertikalen Achse der Fig. 53 liegt. Diese planare Spule erzeugt ein Magnetfeld ähnlich demjenigen, das von einer planaren Spule erzeugt wird, bei der die Spule aus einem mäanderförmigen Abschnitt und einem spiralförmigen Abschnitt besteht.

Von den in den Fig. 51, 52 und 53 gezeigten planaren Spulen hat die Spule nach Fig. 52 die höchste Induktivität. Die planare Spule nach Fig. 51 besitzt den niedrigsten Induktivitätswert. Die planare Spule 53 hat einen Zwischen-Induktivitätswert.

Folglich kann jede planare Induktivität gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung ihren eigenen, leicht einstellbaren Induktivitätswert haben, wobei die Einstellung einfach durch Auswahl der Verbindung der Einzelwindungsspulen 40 erfolgt, wie es oben erläutert ist. Die Einzelwindungsspulen 40 können auch auf andere Weise als in den drei oben speziell erläuterten Verfahren gemäß den Fig. 51, 52 und 53 verbunden werden, so daß der Induktivitätswert der planaren Induktivität einen von dem Anwender der Induktivität gewünschten Wert aufweisen kann.

Fig. 54 ist ein Diagramm, welches den Induktivitätswert darstellt, den jede der Einzelwindungsspulen 40 des planaren magnetischen Elements nach Fig. 49 aufweist, wenn die Anschlüsse an eine Spannungsversorgung angeschlossen sind.

Wie aus Fig. 54 ersichtlich ist, besitzen die Einzelwindungsspulen 40 unterschiedliche Induktivitätswerte, wenn sie individuell an die gleiche Spannungsversorgung angeschlossen werden. Dies bedeutet, daß die planare Spule gemäß Fig. 49 geringfügig verschiedene Induktivitätswerte haben kann, wobei dies dadurch erreicht wird, daß sämtliche oder nur einige der Einzelwindungsspulen 40 in verschiedener Weise (einschließlich den oben anhand der Fig. 51 bis 53 erläuterten Weisen) verbunden werden, entweder einzeln oder in Kombination. In anderen Worten: der Induktivitätswert der planaren Spule (Fig. 49) kann in einem breiten Bereich genau getrimmt werden.

Das in Fig. 49 gezeigte planare magnetische Element kann in verschiedener Weise modifiziert werden, um als planarer Transformator zu fungieren, wie anhand der Fig. 55 bis 58 erläutert wird. Die Einzelwindungsspulen 40 des Elements werden in mindestens zwei Gruppen unterteilt, und die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen jeder Gruppe werden in verschiedener Weise verschaltet.

Fig. 55 und 56 zeigen Transformatoren mit einem Eingang und einem Ausgang. Fig. 57 zeigt einen Transformator mit einem Eingang und zwei Ausgängen. Bei jedem Transformator, bei dem die Einzelwindungsspulen 40 in zwei oder mehr Gruppen unterteilt sind, ist die Art und Weise der Verschaltung der Einzelwindungsspulen 40 nicht auf die Beispiele nach den Fig. 55 bis 57 beschränkt. Durch das Verbinden der Einzelwindungsspulen 40, die eine Primärspule bilden, derjenigen, die eine Sekundärspule bilden, sowie derjenigen, die eine Tertiärspule bilden, und so weiter, in verschiedener Weise läßt sich der Induktivitätswert der Spule oder der Kopplungskoeffizient zwischen den Spulen einstellen. Mithin läßt sich das Spannungsverhältnis und das Stromverhältnis des Transformators extern einstellen. Fig. 58 veranschaulicht die Beziehung zwischen den Spannungs- und Stromverhältnissen des in Fig. 49 gezeigten magnetischen Elements einerseits, und die Art der Verschaltung der Außenanschlüsse andererseits.

Das in Fig. 50 gezeigte planare magnetische Element kann zu einem Transformator modifiziert werden, dessen Spannungsverhältnis und Stromverhältnis noch genauer einstellbar ist als bei dem Transformator, der durch Modifizieren des planaren magnetischen Elements nach Fig. 49 gebildet wird, welcher weniger Ausgangsanschlüsse besitzt. Allerdings gilt: je mehr Ausgangsanschlüsse, desto schwieriger ist es für den Anwender, die Verschaltung korrekt durchzuführen. Deshalb ist es zu empfehlen, daß ein planares magnetisches Element mit zwei bis vier Ausgangsanschlüssen benutzt wird, wie es bei den Elementen nach den Fig. 51 und 55 der Fall ist.

Im Fall einer planaren Induktivität, deren elektrische Eigenschaften nicht extern eingestellt werden müssen, und die einen hohen Induktivitätswert besitzen muß, muß die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Einzelwindungsspulen so schmal sein, wie es die verfügbaren Herstellungsverfahren zulassen, und die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen müssen in der in Fig. 52 gezeigten Weise verschaltet werden, so daß die Induktivität einen hohen Induktivitätswert aufweisen kann. Im Fall eines planaren magnetischen Elements, welches unter Einbuße des Induktivitätswertes einen besonderen Frequenzgang besitzen muß, muß die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Einzelwindungsspulen so breit sein, wie es der Herstellungsvorgang gestattet, während die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen in der in Fig. 51 dargestellten Weise verschaltet sein müssen, damit diese Induktivität einen sehr guten Frequenzgang besitzt. Im Fall eines planaren Transformators, dessen elektrische Eigenschaften nicht von außen einstellbar sein müssen, muß die Lücke zwischen jeweils benachbarten Einzelwindungsspulen so schmal wie möglich sein, wodurch der Transformator sehr wirksam für spezielle Zwecke

arbeitet.

Um das planare magnetische Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung zu miniaturisieren, ist es wünschenswert, daß die Elemente durch dasselbe Dünnschichtverfahren hergestellt werden, wie es aus der Herstellung von Halbleiterbauelementen bekannt ist. Wenn diese Elemente auf einem aus Si oder GaAs bestehenden Halbleitersubstrat zusammen mit aktiven Elementen wie Transistoren und passiven Elementen wie Widerständen und Kondensatoren gebildet werden, läßt sich ein kleines monolithisches Bauelement fertigen. Die planaren magnetischen Elemente können in derselben Ebene liegen, wie die aktiven Elemente, sie können aber auch oberhalb oder unterhalb der aktiven Elemente angeordnet sein.

Fig. 59 ist eine Schnittansicht eines elektronischen Bauelements, welches ein Halbleitersubstrat 10, ein auf dem Substrat 10 gebildetes aktives Element 90 und ein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung aufweist, letzteres ist ebenfalls auf dem Substrat 10 gebildet. Fig. 60 ist eine Schnittansicht eines anderen Bauelements, welches ein Halbleitersubstrat 10, ein auf diesem gebildetes aktives Element 90, eine auf dem Substrat 10 ausgebildete Isolierschicht 20, eine auf der Isolierschicht 20 gebildete Verdrahtungsschicht 95, eine die Verdrahtungsschicht 95 abdeckende Isolierschicht 20 und zwei planare magnetische Elemente 1 gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung aufweist, ebenfalls auf der Isolierschicht 20 befindlich. Fig. 61 ist eine Schnittansicht eines elektrischen Bauelements, welches aufweist: ein Halbleitersubstrat 10, zwei planare magnetische Elemente 1 gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung auf dem Substrat 10, eine die planaren magnetischen Elemente abdeckende Isolierschicht und ein auf der Schicht 20 befindliches aktives Element 90. In diesen Bauelementen sind das Substrat 10, das aktive Element 90 und das magnetische Element oder die magnetischen Elemente 1 elektrisch über (nicht gezeigte) Kontaktlöcher verbunden.

Nicht nur die planaren magnetischen Elemente gemäß dem fünften Aspekt, sondern auch die planaren magnetischen Elemente gemäß jedem anderen Aspekt der Erfindung, können jeweils als Induktivitätselement oder als Transformator aus gebildet sein, jeweils beinhaltend mindestens eine planare Spule. Diese Elemente können ebenfalls auf diesem Halbleitersubstrat zusammen mit aktiven Elementen und passiven Elementen zur Bildung einer integrierten Schaltung ausge bildet sein.

Schließlich sollen im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 62A bis 64 die planaren magnetischen Elemente gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung beschrieben werden.

Fig. 62A und 62B sind eine Schnittansicht beziehungsweise eine teil weise geschnittene perspektivische Ansicht einer Einzelwindungsspule gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung. Wie Fig. 62A zeigt, enthält diese Einzelwindungsspule einen hohlen scheibenförmigen Leiter 42, einen in den Leiter 42 einge paßten ringförmigen hohlen Isolator 20 und ein in den Isolator 20 eingebettetes ringförmiges magnetisches Element 30.

Der hohle Leiter 42 besitzt überall einen großen Querschnitt. Damit kann ein starker Strom durch den Leiter 42 fließen, und das magnetische Element 30 magnetisieren. Wie aus den Fig. 62A und 62B hervorgeht, besitzt die Einzelwindungsspule einen vollständig abgeschirmten Kern, während das planare magnetische Element gemäß Fig. 17 einen teilweise freiliegenden Kern aufweist. Praktisch keine magnetischen Flüsse, die von dem magnetischen Element 30 erzeugt werden, gelangen aus der Einzelwindungsspule. Diese Einzelwindungsspule besitzt eine Stromaufnahmefähigkeit, die weit größer ist als jene, der planaren magnetischen Elemente nach den Fig. 17 und 18, obschon das Element nach Fig. 17 einen höheren Induktivitätswert bei Frequenzen unterhalb von 1 MHz aufweist und das Element nach Fig. 18 einen höheren Induktivitätswert bei Frequenzen von mehr als 1 MHz besitzt.

Die in den Fig. 62A und 62B dargestellte Einzelwindungsspule besitzt einen Induktivitätswert L, der sich folgendermaßen errechnet:

$$L = 2 \mu_s \cdot \delta_2 \ln(d_1/d_2) \times 10^{-7}$$

wobei  $\mu_s$  die spezifische Permeabilität des magnetischen Elements 30,  $d_1$  der Durchmesser des polähnlichen Abschnitts des Leiters 42,  $d_2$  der Außendurchmesser des scheibenförmigen Leiters 42 und  $\delta_2$  die Dicke des magnetischen Elements 30 ist.

Der Gleichstromwiderstand  $R_{DC} (\Omega)$  der Einzelwindungsspule beträgt:

$$R_{DC} = (K/I\delta_1) \ln(d_1/d_2)$$

wobei K der spezifische Widerstand des Leiters 42 ist.

Wenn der Leiter 42 aus Aluminium besteht, das eine zulässige Stromdichte von  $10^8 \text{ A/m}^2$  aufweist, errechnet sich der zulässige Strom ( $I_{max}$ ) der Einzelwindungsspule gemäß Fig. 62A und 62B folgendermaßen:

$$I_{max} = I \times 10^8 d_1 d_2 (\text{A}).$$

Im Fall einer planaren Induktivität, die eine übliche spiralförmige planare Spule mit derselben Größe wie diese Einzelwindungsspule aufweist, ist der Querschnitt des Leiters der planaren Spule weit kleiner. Damit hat diese planare Induktivität eine zulässige Stromdichte  $I_{max}$  von lediglich einigen zehn Ampere.

Man kann mehrere der Einzelwindungsspulen des in Fig. 62A und 62B gezeigten Typs zur Bildung einer Spuleneinheit in Reihe schalt n. Fig. 63A ist eine Schnittansicht einer solchen Spuleneinheit. Offensichtlich besitzt diese Spuleneinheit einen sehr hohen Induktivitätswert. Weiterhin lassen sich mehrere Spuleneinheiten des in Fig. 63A gezeigten Typs übereinander anordnen, wie dies in Fig. 63B gezeigt ist, um eine dickere Spuleneinheit zu erhalten, die einen noch höheren Induktivitätswert pro Flächeneinheit aufweist, als die in Fig. 63A gezeigte Spuleneinheit.

Die Einzelwindungsspule nach Fig. 62A und 62B läßt sich zu einem planaren Transformator des in Fig. 64

gezeigten Typs modifizieren. Der planare Transformator nach Fig. 64 ist dadurch gekennzeichnet, daß zwei hohle, scheibenförmige Leiter 42A und 42B, verwendet als Primärspule beziehungsweise als Sekundärspule, ein magnetisches Element 30 umfassen, wobei ein Isolator 20A das magnetische Element 30 bedeckt und ein weiterer Isolator 20B zwischen den Leitern 42A und 42B liegt. Zwei Sätze von hohlen, scheibenförmigen Leitern können einen ersten Satz für eine Primärspule und einen zweiten Satz für eine Sekundärspule bilden. Die Anzahl von Leitern der ersten Gruppe und die Anzahl von Leitern der zweiten Gruppe bestimmt sich jeweils nach Maßgabe des gewünschten Windungsverhältnisses des Transformators.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung wurden im Detail beschrieben und erläutert. Erfindungsgemäß können die Elemente nach verschiedenen Aspekten der Erfindung, die jeweils bessere Kennwerte aufweisen als die herkömmlichen Elemente, in jeder beliebigen Kombination eingesetzt werden, so daß dadurch neue Arten und Typen von planaren Elementen geschaffen werden, die noch bessere Eigenschaften und Kennwerte sowie eine bessere Arbeitsleistung und Einsetzbarkeit aufweisen.

#### Auswahl der Materialien

Im folgenden sollen Materialien für die Komponenten der planaren magnetischen Elemente gemäß der Erfindung erläutert werden, das heißt für das Substrat 10, die Isolierelemente 20, die magnetischen Elemente 30 und den Leiter 42.

Der Spulenleiter 42 besteht aus einem Metall geringen Widerstands, wie zum Beispiel Aluminium (Al), einer Al-Legierung, Kupfer (Cu) einer Cu-Legierung, Gold (Au) oder einer Au-Legierung, Silber (Ag) oder Ag-Legierung. Die Materialien für den Leiter 42 sind selbstverständlich nicht auf die angegebenen Beispiele beschränkt. Der Nennstrom der aus dem Spulenleiter 42 gebildeten planaren Spule ist proportional zu der zulässigen Stromdichte des Materials niedrigen Widerstands des Leiters 42. Folglich ist es wünschenswert, daß das Material in hohem Maß widerstandsfähig gegenüber Elektronenwanderung, Spannungsverschiebung oder thermischer Verschiebung ist, die möglicherweise den Spulenleiter durchtrennt. Die magnetischen Elemente 30 bestehen aus einem aus vielen möglichen Materialien ausgewählten Material, wobei die Auswahl im Hinblick auf die Eigenschaften und Kennwerte der Induktivität oder des Transformators, der diese Elemente 30 beinhaltet, und auch im Hinblick auf die Frequenzbereiche, in denen die planare Induktivität oder der Transformator mit diesen Elementen 30 zu betreiben ist, erfolgt. Beispiele für Stoffe der Elemente 30 sind: Permalloy, Ferrit, Sendust, verschiedene amorphe magnetische Legierungen oder magnetischer Einkristall. Wenn die Induktivität oder der Transformator als Stromversorgungselement verwendet wird, sollten die Elemente 30 aus einem Material bestehen, welches eine hohe magnetische Sättigungsflußdichte besitzt.

Die magnetischen Elemente 30 können aus einem Verbundmaterial bestehen. Zum Beispiel kann es sich um ein Laminat aus einer FeCo-Schicht und einer SiO<sub>2</sub>-Schicht handeln, um eine künstliche Gitterschicht, um eine Mischphasenschicht aus FeCo-Phase und B<sub>4</sub>C-Phase oder um eine Schicht mit dispergierten Teilchen. Werden die magnetischen Elemente auf dem Spulenleiter 42 gebildet, so müssen sie nicht notwendigerweise elektrisch isolierend sein. Wenn allerdings die magnetischen Elemente elektrisch leitend sind, muß zwischen ihnen einerseits und dem Spulenleiter 42 andererseits eine Isolierschicht angeordnet werden.

Um den Einfluß der Sättigung der magnetischen Elemente auszuschalten, ist es wünschenswert, daß die magnetischen Elemente mit ihren Achsen des schwer magnetisierbaren Feldes ausgerichtet sind mit den Magnetisierungsachsen der planaren Spule, und ein anisotropes Magnetfeld zu erzeugen, welches stärker ist als das durch den Spulenstrom erzeugte Magnetfeld. Die magnetischen Elemente sollten am besten aus Material mit hoher Sättigungsmagnetisierung bestehen, welches außerdem ein anisotropes Magnetfeld H<sub>k</sub> mit einer geeigneten Stärke besitzt. Um weiterhin den aus der Mehrschichtstruktur resultierenden mechanischen Spannungseffekt zu minimieren, sollten die magnetischen Elemente vorzugsweise aus einem Material mit einer kleinen Magnetostriktion bestehen (zum Beispiel  $B_s < 10^{-6}$ ).

Das Kriterium für die Auswahl eines Materials für die magnetischen Elemente soll im folgenden unter Bezugnahme auf Fig. 65 erläutert werden, welche die Beziehung zwischen der Anzahl von Windungen der spiralförmigen planaren Spule einerseits und dem maximalen Spulenstrom und der Stärke (H) des durch den durch die Spule fließenden zulässigen Strom erzeugten Magnetfeldes andererseits veranschaulicht. Dieses Diagramm wurde durch Versuche erstellt, bei denen planare magnetische Elemente verschiedener Größe getestet wurden. Jedes dieser Elemente besitzt eine planare Spule mit einer unterschiedlichen Anzahl von Windungen, zwei magnetische Elemente mit unterschiedlicher Größe, und zwei Isolierschichten, von denen je eine zwischen der Spule und einer der magnetischen Schichten liegt. Die in diese Elemente eingebauten Spulen sind hinsichtlich des verwendeten Leiters und der zwischen den Windungen befindlichen Lücken identisch. Der Leiter besteht aus einer Al-Cu-Legierung mit einer Dicke von 10 µm und einer zulässigen Stromdichte von  $5 \times 10^8$  A/m<sup>2</sup>. Die Lücke zwischen den Windungen beträgt 3 µm. Die Isolierschichten besitzen eine Dicke von 1 µm.

Das Magnetfeld, welches erzeugt wird, wenn der zulässige Strom in die Spule eingespeist wird, besitzt eine Stärke von etwa höchstens 20 bis 30 Oe. Wenn der maximale Spulenstrom auf 80% des zulässigen Stroms eingestellt ist, wird an die magnetischen Elemente ein Magnetfeld gelegt, dessen Intensität 16 bis 40 Oe im Höchstfall beträgt. In diesem Fall brauchen die magnetischen Elemente ein anisotropes Magnetfeld H<sub>k</sub> mit einer Stärke von 16 bis 24 Oe.

Die Stärke des anisotropen Magnetfeldes hängt ab von den strukturellen Parametern des magnetischen Elements. Damit ist das anisotrope Magnetfeld nicht auf ein solches beschränkt, welches eine Stärke von 16 Oe bis 24 Oe besitzt. Grundsätzlich ist zu bevorzugen, daß dieses Magnetfeld eine Stärke von 5 Oe und mehr aufweist, um den Einfluß der Sättigung der magnetischen Elemente zu beseitigen.

Das Substrat 10 ist hinsichtlich der Materialauswahl nicht beschränkt, vorausgesetzt, daß mindestens diejenige



Fläche des Substrats 10, die ein magnetisches Element oder einen Leiter kontaktiert, elektrisch isolierend ist. Um jedoch die Bereitschaft für die Mikroverarbeitung zu fördern und die Herstellung eines Ein-Chip-Bauelements zu erleichtern, ist es wünschenswert, wenn das Substrat 10 aus einem Halbleiter besteht. Besteht das Substrat 10 aus einem Halbleiter, so muß seine Oberfläche isolierend gemacht werden, indem auf ihr eine Oxidschicht gebildet wird.

Die Isolierschichten 20 können aus einem anorganischen Stoff, wie zum Beispiel  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oder einem organischen Stoff wie zum Beispiel Polyimid bestehen. Um die zwischen den Schichten bestehende kapazitive Kopplung herabzusetzen, sollten die Schichten 20 besser aus einem Material bestehen, welches eine möglichst geringe Dielektrizitätskonstante besitzt. Die Schichten 20 müssen dick genug sein, um die magnetische Anisotropie jeder der Magnetschichten 30 unabhängig von der magnetischen Kopplung zwischen den magnetischen Schichten 30 aufrechtzuerhalten. Die optimale Dicke der Schicht 20 hängt ab von dem Material der magnetischen Schichten 30.

#### Beispiel 1

Ein magnetisches Element des in Fig. 6 dargestellten Typs wurde nach dem folgenden Verfahren hergestellt und hinsichtlich seiner Kennwerte getestet.

Die Oberfläche eines Siliciumsubstrats wurde thermisch oxidiert, um eine 1  $\mu\text{m}$  dicke erste  $\text{SiO}_2$ -Schicht zu erzeugen. Durch Zerstäubung wurde eine Sendust-Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Dann wurde ebenfalls durch Zerstäuben auf der Sendust-Schicht eine zweite  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  erzeugt.

Auf der zweiten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde durch Zerstäuben eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Al-Cu Legierungs-Schicht gebildet, die als Spulenleiter vorgesehen war. Es wurde eine vierte  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1,5  $\mu\text{m}$  als Atzmaske auf der Al-Cu-Legierungs-Schicht erzeugt. Die vierte  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde mit einem Positiv-Fotoresist überzogen. Es erfolgte ein Fotoätzen, um auf diese Weise das Fotoresistmaterial mit einem Muster zu versehen, entsprechend der Gestalt einer spiralförmigen Spule mit Windungen, die eine Abstandslücke von 3  $\mu\text{m}$  besaßen. Auf diese Struktur wurde  $\text{CF}_4$ -Gas gegeben, um ein reaktives Ionenätzen durchzuführen, wobei das Fotoresistmaterial als Maske diente. Die freiliegenden Bereiche der vierten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurden entfernt, so daß eine  $\text{SiO}_2$ -Maske in Form einer spiralförmigen Spule entstand. Als nächstes wurde  $\text{Cl}_2$ - und  $\text{BCl}_3$ -Gas auf die so erhaltene Struktur geleitet, um ein reaktives Magnetron-Niederdruck-Ionenätzen durchzuführen. Im Ergebnis wurden die freiliegenden Abschnitte der Al-Cu-Legierungs-Schicht fortgeätzt, wodurch ein spiralförmiger Spulenleiter entstand.

Gleichzeitig mit dem reaktiven Ionenätzen wurde eine vertikale anisotrope Ätzung auf der Al-Cu-Legierungs-Schicht erreicht. Dieses Ätzen war insofern erfolgreich, als das Ätzverhältnis der Al-Cu-Legierung 15 bezüglich der  $\text{SiO}_2$ -Maske der ersten, der zweiten und der dritten  $\text{SiO}_2$ -Schichten betrug.

Im Ergebnis erhielt man eine quadratische spiralförmige planare Spule mit einer Breite von 2 mm, mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$ , einer Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$  und einem Zwischenwindungs-Abstand von 3  $\mu\text{m}$ . Das Lücken-Geometrie-Verhältnis der spiralförmigen Spule betrug 3,3 ( $= 10 \mu\text{m}/3 \mu\text{m}$ ).

Dann wurde das Fotoresistmaterial sowie die  $\text{SiO}_2$ -Maske entfernt. Auf der Oberfläche der gesamten Struktur wurde durch vorgespanntes Zerstäuben eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet, um die Lücken zwischen den Windungen mit  $\text{SiO}_2$  auszufüllen. Es erfolgte ein Rückätzen, um dadurch die Oberseite dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht abzuflachen. Dann wurde auf dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine Sendust-Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet, und auf der Sendust-Schicht wurde eine Schutzschicht aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  erzeugt. Als Ergebnis war eine planare Induktivität fertiggestellt.

Die so hergestellte planare Induktivität wurde mittels einer Impedanzmessers getestet. Bei einer Frequenz von 2 MHz zeigte die Induktivität einen Widerstand (R) von 5,8  $\Omega$ , einen Induktionswert (L) von 3,78  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten (Q) von 8.

Weiterhin wurde die planare Induktivität in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V und eine Ausgangsspannung von 5 V bei einer Ausgangsleistung von 500 mW.

Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie arbeitete gut. Die geringen Leistungsverluste, die auf die planare Induktivität zurückzuführen waren, betrugen 58 mW und die auf die übrigen Elemente zurückzuführenden Leistungsverluste (das heißt die auf die Halbleiterelemente zurückzuführenden Verluste) betrugen 156 mW. Der Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers betrug 70% bei Nennlast.

Nach dem gleichen Verfahren, wie es oben erläutert ist, wurde eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich allerdings darin, daß ihr Al-Cu-Legierungs-Leiter eine Breite von 21  $\mu\text{m}$ , einen Zwischenwindungs-Abstand von 20  $\mu\text{m}$  und eine Dicke von 4  $\mu\text{m}$  besaß. Damit betrug das Lücken-Geometrie-Verhältnis der in die Vergleichsinduktivität eingebauten spiralförmigen Spule 0,2. Die Vergleichsinduktivität wurde mittels eines Impedanzmessers getestet. Bei einer Frequenz von 2 MHz ergab sich ein Widerstand (R) von 10,3  $\Omega$ , ein Induktivitätswert (L) von 3,7  $\mu\text{H}$  und ein Gütekoeffizient (Q) von 4,5. Die Vergleichsinduktivität wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler des oben beschriebenen Typs eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler wurde getestet, und es wurde heraus gefunden, daß der Leistungsverlust aufgrund der planaren Vergleichsinduktivität 103 mW betrug, während der Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers lediglich 65% betrug.

#### Beispiel 2

Mit dem gleichen Verfahren wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 1 wurde ein planarer Transforma-



tor mit zwei quadratischen spiralförmigen planaren Spulen und zwei magnetischen Schichten hergestellt. Die erste Spule besaß als Primärspule eine Breite von 2 mm, 20 Windungen und eine Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$ , eine Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$ , einen Windungsabstand von 3  $\mu\text{m}$  und ein Lücken-Geometrieverhältnis von 3,3. Die zweite, als Sekundärspule verwendete Spule war der ersten Spule identisch, mit der Ausnahme, daß sie 40 Windungen besaß. Die magnetischen Schichten hatten einen Abstand von 23  $\mu\text{m}$ .

Der planare Transformator wurde getestet mit Hilfe eines Impedanzmessers, um die elektrischen Kennwerte zu ermitteln. Es ergab sich eine Primärspulen-Induktivität von 3,8  $\mu\text{H}$ , eine sekundärseitige Induktivität von 14  $\mu\text{H}$ , eine Gegeninduktivität von 6,8  $\mu\text{H}$  und ein Kopplungskoeffizient von 0,93.

An die erste Spule des planaren Transformators wurde eine Sinusspannung von 500 kHz bei einem Effektivwert von 1 V angelegt. Dadurch erzeugte die Sekundärspule eine Sinusspannung mit einem Effektivwert von 1,7 V. Bei einer rein ohmschen Last von 200  $\Omega$  an dem planaren Transformator ergab sich eine Spannungsschwankung von etwa 10%.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, der mit einer Schaltfrequenz von 2 MHz arbeitete, und der Gleichstromwandler wurde geprüft. Er besaß eine Eingangsspannung von 3 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 100 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie der planare Transformator arbeitete. Als Ergebnis zeigte sich, daß der auf den Transformator zurückzuführende Leistungsverlust 88 mW bei der Nennlast des Gleichstromwandlers betrug.

Um die Leistungsfähigkeit des planaren Transformators zu ermitteln, wurde außerdem ein planarer Vergleichstransformator nach dem oben beschriebenen Verfahren hergestellt. Dieser enthielt zwei quadratische spiralförmige planare Spulen und zwei magnetische Schichten. Die erste Spule war als Primärspule 2 mm breit, hatte 20 Windungen und eine Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$  und eine Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$  bei einem Lückenabstand von 10  $\mu\text{m}$  und einem Lücken-Geometrieverhältnis von 1,0. Die zweite, als Sekundärspule verwendete Spule war identisch wie die erste Spule aufgebaut, sie hatte aber 40 Windungen. Die magnetischen Schichten hatten einen gegenseitigen Abstand von 23  $\mu\text{m}$ .

An die erste Spule des planaren Vergleichstransformators wurde eine Sinusspannung mit 500 kHz und einer effektiven Spannung von 1 V angelegt. Als Ergebnis erzeugte die zweite Spule eine Sinusspannung mit einem Effektivwert von 1,3 V. Die Spannung an der zweiten Spule ist kleiner als die bei dem erfindungsgemäßen planaren Transformator. Dies deshalb, weil der Spannungsabfall an der ersten Spule wegen des hohen Widerstands der ersten Spule beträchtlich war. Unvermeidlich ist die Verstärkung des Vergleichstransformators geringer als bei dem erfindungsgemäßen planaren Transformator.

Als an den planaren Vergleichstransformator eine rein ohmsche Last von 200  $\Omega$  angeschlossen wurde, wurden Spannungsschwankungen von etwa 18% beobachtet.

Der planare Vergleichstransformator wurde in einen Vorwärts-Gleichspannungswandler des oben beschriebenen Typs eingebaut. Der Gleichspannungswandler wurde getestet, um zu sehen, wie der Vergleichstransformator arbeitete. Das Testergebnis zeigte, daß der auf den Transformator zurückzuführende Leistungsverlust 152 mW bei der Nennlast des Gleichspannungswandlers betrug.

### Beispiel 3

Es wurde ein magnetisches Element des in Fig. 12A und 12B dargestellten Typs nach folgendem Verfahren hergestellt, und dessen Kennlinien wurden gemessen.

Auf einem Siliciumsubstrat wurde eine 1  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Isolierschicht erzeugt, die mit einer 5  $\mu\text{m}$  dicken Aluminiumschicht, deren spezifischer Widerstand  $2,9 \times 10^{-6} \Omega$  betrug, durch Zerstäuben aufgebracht wurde. Die Aluminiumschicht wurde durch Fotoätzung behandelt, um ein spiralförmiges Spulenmuster mit 200 Windungen auszubilden. Die Spule hatte einen Innendurchmesser von 1 mm und einen Außendurchmesser von 5 mm. Die Spule bestand aus 200 Windungen in Intervallen von 10  $\mu\text{m}$  mit einer jeweiligen Breite von 5  $\mu\text{m}$ . Demnach betrug das Leitungs-Geometrieverhältnis 1. Die spiralförmige planare Spule hatte einen Widerstand von 120  $\Omega$  und einen Induktivitätswert von 0,14 mH.

Die so ausgebildete planare Spule wurde in einen abwärts transformierenden Zehacker-Gleichstromwandler der 0,1 W-Klasse eingebaut, der bei einer Betriebsfrequenz von 300 kHz arbeitete. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um das Verhalten der planaren Spule herauszufinden. Diese fungierte als Induktivität innerhalb des Gleichstromwandlers.

Nach dem oben beschriebenen Verfahren wurde eine spiralförmige, planare Vergleichsspule hergestellt. Diese hatte den gleichen Innen- und Außendurchmesser wie die erfindungsgemäße Spule. Sie besaß 130 Windungen in Abständen von 15  $\mu\text{m}$ , jeweils mit einer Breite von 10  $\mu\text{m}$ . Demnach betrug das Leiter-Geometrieverhältnis 0,5. Die Vergleichsspule besaß einen Induktivitätswert von 0,05 mH.

### Beispiel 4

Es wurde die gleiche spiralförmige planare Spule wie im Beispiel 3 hergestellt, mit der Ausnahme, daß diese Spule einen Leiter aus einer amorphen Co-Si-B-Legierung mit einer Dicke von 2  $\mu\text{m}$  und zwei den Leiter einschließenden  $\text{SiO}_2$ -Schichten mit einer Dicke von 2  $\mu\text{m}$  besaß. Die planare Spule hatte eine Induktivität von 2 mH.

### Beispiel 5

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, bei dem zwei planare spiralförmige Spulen übereinander angeordnet werden. Die erste (untere) Spule diente als Primärspule und hatte die Parameter gemäß Beispiel 4.

Die zweite (obere) Spule diente als Sekundärspule und war etwa konzentrisch zu der ersten Spule angeordnet. Sie besaß 100 Windungen in Intervallen von 20 µm mit einer Dicke von 5 µm und einer Breite von 5 µm. Das Leiter-Geometrieverhältnis betrug 1. Der planare Transformator wurde getestet. Die Testergebnisse zeigten, daß das Spannungsverhältnis dieses Transformators 2 betrug, also genauso groß war wie das Verhältnis der Windungen der Primärspule zu den Windungen der Sekundärspule.

#### Beispiel 6

Es wurde ein dem Beispiel 3 ähnelndes planares magnetisches Element nach einem anderen Verfahren hergestellt. Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mit einer Dicke von 4 µm erzeugt. Dann wurde eine einkristalline Aluminiumschicht mit einer Dicke von 10 µm und einem spezifischen Widerstand von  $2,6 \times 10^{-6}$  cm durch MBE (Molekularstrahlepitaxie) auf der SiO<sub>2</sub>-Schicht erzeugt. Die Aluminiumschicht wurde unter Einsatz von Fotoresistmaterial geätzt und mit einem Muster einer spiralförmigen planaren Spule versehen, deren Innendurchmesser 1 mm und deren Außendurchmesser 5 mm betrug. Diese Spule hatte 200 Windungen, jeweils mit einer Breite von 5 µm und in Intervallen von 10 µm angeordnet. Damit besaß die Spule ein Leiter-Geometrieverhältnis von 2. Ihr Widerstand betrug 50 Ω, ihre Induktivität 0,14 mH.

Der Widerstand dieser Spule war niedriger als im Beispiel 3. Deshalb besaß die Spule einen zulässigen Strom, der größer war als im Beispiel 3. Deshalb eignete sich die Spule zum Einsatz in Hochleistungsgeräten.

#### Beispiel 7

Es wurde ein planares magnetisches Element mit dem gleichen Aufbau wie im Beispiel 3 hergestellt, jedoch nach einem anderen Verfahren. Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Auf letzterer wurde durch Dampfniederschlagung eine Al-Si-Cu-Legierungsschicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Auf dieser wiederum wurde mittels CVD-Verfahren eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht erzeugt. Auf dieser SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde ein Resistmaterialmuster gebildet. In einer Magnetron-RIE-Apparatur wurde die Al-Si-Cu-Legierungsschicht geschnitten, um eine mäanderförmige, quadratische Spule mit einem Durchmesser von 1 mm und einem Außendurchmesser von 4 mm zu erzeugen.

Außerdem wurde auf der mäanderförmigen, quadratischen Spule eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mittels Plasma-CVD-Verfahren erzeugt, bei dem Monosilan (SiO<sub>4</sub>) und Stickoxid (N<sub>2</sub>O) als Materialien eingesetzt wurden. (Die Wachstumsgeschwindigkeit der SiO<sub>2</sub>-Schicht auf der Spule hing von der Zufuhrmenge dieser Materialien ab). Die SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde so geformt, daß die Lücken zwischen den Windungen der Spule durch diese Schicht überbrückt wurden, so daß erfolgreich Hohlräume entstanden aufgrund des schmalen Zwischenwindungs-Abstands von 1 µm und dem großen Leiter-Geometrieverhältnis von 2,5. Das sich ergebende planare Element besaß einen Induktivitätswert von 1,6 mH.

Wegen der so gebildeten Hohlräume war die Zwischenwindungs-Kapazität viel kleiner als im Vergleichselement, bei dem die Zwischenwindungs-Abstände mit SiO<sub>2</sub> gefüllt waren, und der Frequenzgang im hohen Frequenzbereich war wesentlich besser als beim Vergleichsbeispiel. Die Induktivität des planaren magnetischen Elements nahm nicht ab, bevor die Betriebsfrequenz auf 10 MHz angehoben wurde, während die Induktivität des Vergleichselements bei einer Betriebsfrequenz von 800 kHz scharf abnahm.

#### Beispiel 8

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung nach dem in Verbindung mit den Fig. 13A bis 13D erläuterten Verfahren hergestellt, welches Hohlräume zwischen den Windungen der spiralförmigen planaren Spule besaß.

Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat durch thermische Oxidation eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet, auf der eine 1 µm dicke Aluminiumschicht erzeugt wurde. Diese Struktur wurde in der Atmosphäre stehengelassen, wodurch die Aluminiumschicht oxidierte und sich eine etwa 30 Å dicke Oxidschicht bildete. Es wurden vier weitere Aluminiumschichten mit einer Dicke von jeweils 1 µm übereinander erzeugt. Jede dieser Aluminiumschichten, bis auf die oberste, hatte eine in der gleichen Weise wie die erste Aluminiumschicht oxidierte Oberfläche in Form einer etwa 30 Å dicken Oxidschicht. Als Ergebnis erhielt man eine leitende Schicht mit einer Dicke von 5 µm auf der SiO<sub>2</sub>-Schicht.

Anschließend wurde auf der leitenden Schicht durch Plasma-CVD eine Siliciumoxidschicht gebildet. Die sich ergebende Struktur wurde trocken geätzt, um eine quadratische, mäanderförmige Spule mit einer Breite von 5 mm zu erhalten. Die mäanderförmige Spule hatte 1000 Wiederholungsabschnitte, jeweils mit einer Breite von 2 µm und von der nächsten um 0,5 µm beabstandet. Dann wurde auf der mäanderförmigen Spule eine Siliciumoxidschicht gebildet, um die Hohlräume unter den Wiederholungsabschnitten auszubilden.

Auf demselben Siliciumsubstrat wurde ein aufwärtstransformierender Zerkhacker-Gleichstromwandler erzeugt, dessen Eingangsspannung 1,5 V, dessen Ausgangsspannung 3 V und dessen Ausgangsstrom 0,2 mA betragen, wobei der 10 mm lange, 5 mm breite und 0,5 mm dicke Ein-Chip-Gleichstromwandler in der Nähe der Mäanderspule lag. Die Betriebsfrequenz des Schaltelements in dem Gleichstromwandler betrug 5 MHz. Dieser Ein-Chip-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seines Leistungsvermögens getestet. Die Testergebnisse zeigten, daß der Gleichstromwandler voll funktionierte. Allerdings konnte er bei einer Frequenz von 500 kHz wegen fehlender Impedanz nicht gut arbeiten.

Der Ein-Chip-Gleichstromwandler war so dünn, daß ein kartenförmiger Pager (Rufanlage) erzeugt werden konnte, wie er bisher, wenn überhaupt, nur sehr schwierig herzustellen war. Fig. 66 zeigt schematisch einen kartenförmigen Pager mit einem Ein-Chip-Gleichstromwandler gemäß der Erfindung. Dieser Pager enthält

neben dem Ein-Chip-Gleichstromwandler 240 ein Substrat 200, eine Antenne 210, eine Betriebsschaltung 220 und eine Alarmeinrichtung 230 (zum Beispiel einen piezoelektrischen Summer). Die Komponenten 210, 220, 230 und 240 sind auf dem Substrat 200 montiert. Obschon in Fig. 66 nicht dargestellt, enthält der Pager eine Abdeckung zum Schutz der Komponentenzone 210, 220, 230 und 240.

#### Beispiel 9

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung von dem in Fig. 23 gezeigten Typ hergestellt und hinsichtlich seines Leistungsvermögens getestet. Das Element wurde folgendermaßen gefertigt:

Zunächst wurde an einer ersten Polyimidschicht eine Kupferfolie mit einer Dicke von 100  $\mu\text{m}$  haftend befestigt. Die Kupferfolie wurde durch chemisches Naßätzen mit einer spiralförmigen planaren Spule bemustert. Dann wurde auf der Spule eine zweite Polyimidschicht mit einer Dicke von 7 mm ausgebildet. Zwei jeweils 5 mm dicke Folien aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis wurden auf der ersten beziehungsweise der zweiten Polyimidschicht gebildet. Die beiden Polyimidschichten faßten mithin die Spule sandwichartig ein, wobei die Folien aus der amorphen Legierung auf Co-Basis die Spule und die Polyimidschichten zusammenfaßten, so daß eine planare Induktivität erhalten wurde. Die Spule hatte eine Breite  $a_0$  von 11 mm. Die Permeabilität der Folie aus der amorphen Co-Legierung wurde auf 4500 geschätzt, der Abstand  $\alpha$  betrug etwa 1 mm, wobei die Lücke zwischen den Windungen der Spule 114  $\mu\text{m}$  betrug. Die Co-Folien, die als magnetische Schichten verwendet wurden, besaßen eine Breite  $w$  von 11 mm ( $= a_0 + e \alpha$ ).

An die planare Induktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A angelegt und es wurde das magnetische Streufeld in der Nähe der Induktivität mit Hilfe eines hochempfindlichen Gaußmeters gemessen. Die Stärke des magnetischen Streufeldes war innerhalb der detektierbaren Grenzen des Gaußmeters gering.

Um zu bestimmen, ob die Stärke des so gemessenen magnetischen Streufeldes ausreichend gering war im Vergleich zu den Magnetfeldern, die bei herkömmlichen planaren Induktivitäten streuen, wurde eine Vergleichsinduktivität gemäß Beispiel 9 hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich darin, daß ihre magnetischen Schichten eine Breite  $w$  von 12 mm ( $= a_0 + \Omega$ ) besaßen. In die Vergleichsinduktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und das magnetische Leckfeld in der Nähe der Spule wurde mit demselben hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Das magnetische Streufeld hatte eine Intensität von etwa 30 Gauß.

#### Beispiel 10

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung hergestellt. Dieses Element ist von dem in Fig. 29 gezeigten Typ und stellt eine Kombination des Beispiels 9 und der Mittel gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung dar.

Zunächst wurde auf einem Halbleitersubstrat durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine 1  $\mu\text{m}$  dicke magnetische Schicht aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis erzeugt. Auf dieser Schicht wurde durch HF-Zerstäubung eine erste Isolierschicht eine  $\text{SiO}_2$ -Stärke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet. Auf der Isolierschicht wird durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Al-Cu-Legierungsschicht gebildet. Diese Struktur wurde einer reaktiven Magnetron-Ionenätzung unterzogen, um dadurch die Al-Cu-Legierungsschicht zu einer spiralförmigen planaren Spule auszubilden. Auf der Oberseite dieser Struktur wurde eine zweite Isolierschicht ( $\text{SiO}_2$ ) durch Vorspannungs-Zerstäubung gebildet, wodurch die Lücken zwischen den Spulenwindungen gefüllt und die gesamte Spule abgedeckt wurde. Die Oberfläche der zweiten Isolierschicht wurde bearbeitet und flach gemacht. Auf der zweiten Isolierschicht wurde durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine magnetische Schicht aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet. Hierdurch entstand eine planare Induktivität.

Die Permeabilität der beiden amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis wurden mit einem Magnetometer vom Proben-Vibrationstyp gemessen. Die so gemessene Permeabilität betrug etwa 1000. Die spiralförmige planare Spule hatte eine Breite  $a_0$  von 4,5 mm mit einer Lücke zwischen den Spulenwindungen von 12  $\mu\text{m}$ . Aus der Zwischenwindungslücke wurde ein Abstand  $\alpha$  von 77  $\mu\text{m}$  abgeschätzt. Damit wurden amorphe magnetische Schichten auf Co-Basis mit einer Breite  $w$  von 5 mm ( $= a_0 + 6,5 \alpha$ ) hergestellt. In die planare Induktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und es wurde das magnetische Streufeld in der Nähe der planaren Induktivität mit dem hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Die Stärke des magnetischen Streufilters war gering und lag innerhalb der Meßgrenzen des Gaußmeters.

Um zu bestimmen, ob die Stärke des so gemessenen magnetischen Leckfeldes ausreichend gering war oder nicht, wurde nach dem Verfahren gemäß Beispiel 10 eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich von der erfindungsgemäßen Induktivität darin, daß ihre magnetischen Schichten eine Breite von  $w = 4,6 \text{ mm}$  ( $= a_0 + 1,3 \alpha$ ) besaßen. In die Vergleichsinduktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und in der Nähe der Induktivität wurde das magnetische Leckfeld mit dem hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Das magnetische Streufeld hatte eine hohe Stärke von etwa 50 Gauß.

#### Beispiel 11

Es wurden gemäß dem Verfahren nach Beispiel 9 planare Induktivitäten mit unterschiedlichen Werten  $w$  (das heißt unterschiedlichen Magnetschicht-Breiten) hergestellt. Diese Induktivitäten wurden hinsichtlich ihrer Induktivitätswerte getestet. Die planare Induktivität mit einem Wert  $w = 15 \text{ mm}$  zeigte einen Induktivitätswert von 90  $\mu\text{H}$ , etwa 1,3 mal so hoch wie bei der planaren Induktivität, deren Wert  $w = 12 \text{ mm}$  betrug. Diese Zunahme der Induktivität wurde auch bei der planaren Induktivität nach Beispiel 10 beobachtet.

## Beispiel 12

Unter Verwendung der planaren Induktivität nach Beispiel 9 wurde ein in Hybridschaltung ausgeführter abwärtstransformierender Zerkhacker-IC-Wandler mit Schaltelementen (Leistungs-MOSFETs), Gleichrichterdioden und einer Konstantspannungs-Steuerschaltung hergestellt. Die Schaltfrequenz des IC-Wandlers betrug 100 kHz. Eingangs- und Ausgangsspannungen betrugen 10 V beziehungsweise 5 V, die Ausgangsleistung betrug 2 W. Die planare Induktivität zeigte einen Induktivitätswert von 80  $\mu\text{H}$  und darüber und fungierte damit als ausgangssignalsteuernde Drosselspule. Beim Betrieb des IC-Wandlers arbeitete die planare Induktivität gut als Drosselspule. Es zeigte sich allenfalls eine nur geringe Verbindung bezüglich der Schaltwellenformen der MOSFETs. Die Welligkeit der Spannung bei den Ausgangs-Nennwerten (5 V; 0,5 A) hatte bei 10 mV einen Spitzenwert, war also alles andere als problematisch. Um das Leistungsvermögen der planaren Induktivität nach Beispiel 9 als Drosselspule mit einer Vergleichs-Induktivität zu vergleichen, wurde für den Vergleich die Induktivität gemäß Beispiel 4 hergenommen und in einen Gleichstromwandler desselben Typs eingebaut. Dieser IC-Wandler zeigte im Betrieb eine starke Kopplung zu der Schaltwellenform der MOSFETs. Dies möglicherweise deshalb, weil ein ziemlich starkes magnetisches Feld aus der planaren Vergleichs-Induktivität streute. Weiterhin besaß die Ausgangs-Welligkeit der Spannung bei den Nenn-Ausgangsgrößen (5 V; 0,5 A) einen Spitzenwert von 0,1 V, möglicherweise aufgrund der Tatsache, daß die Induktivität nicht 80  $\mu\text{H}$  besaß und mithin die Welligkeit nicht unter drücken konnte.

## Beispiel 13

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung hergestellt, ähnlich dem in Fig. 33 dargestellten Typ. Die Herstellung geschah folgendermaßen:

Zunächst wurde an einer 30  $\mu\text{m}$  dicken ersten Polyimidschicht eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie haftend angebracht und anschließend durch Naßätzen mit einem Muster entsprechend einer spiralförmigen Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einem Zwischenwindungs-Abstand von 100  $\mu\text{m}$  hergestellt. Auf der planaren Spule wurde eine zweite Polyimidschicht mit einer Dicke von 10 mm gebildet. Damit lag die Spule zwischen der ersten und der zweiten Polyimidschicht. Dann wurde diese Struktur zwischen einer ersten und einer zweiten amorphen Magnetschicht auf Co-Basis mit einer uniaxialen magnetischen Anisotropie eingefaßt. Diese magnetischen Schichten wurden hergestellt, indem amorphe magnetische Schichten auf Co-Basis unter Verwendung einer Einzelwalze rasch abgelöscht und anschließend diese Schichten in einem Magnetfeld ausgeglüht wurden. Jede magnetische Schicht besaß ein anisotropes Magnetfeld von 20 Oe, eine Permeabilität von 5000 entlang der Achse schwerer Magnetisierung, und eine magnetische Sättigungs-Flußdichte von 10 kG. Die aus der Spule, zwei Polyimidschichten und zwei magnetischen Schichten bestehende Struktur wurde zwischen einer dritten Polyimidschicht und einer vierten Polyimidschicht sandwichähnlich eingefaßt, von denen jede 5  $\mu\text{m}$  dick war. Diese Struktur wiederum wurde zwischen dritten und vierten amorphen magnetischen Filmen auf Co-Basis mit jeweils uniaxialer magnetischer Anisotropie und einer Dicke von 15  $\mu\text{m}$  eingefaßt, so daß eine 10 mm breite planare Induktivität erhalten wurde. Die erste und die zweite magnetische Schicht wurden mit ihren Achsen der leichten Magnetisierung ausgerichtet. Die dritte und die vierte magnetische Schicht wurden derart angeordnet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich mit denjenigen der ersten und der zweiten magnetischen Schicht schnitten.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der so erzeugten planaren Induktivität wurde ermittelt. Der Induktivitätswert der planaren Induktivität blieb unverändert bei 12,5  $\mu\text{H}$ , bis der Eingangsstrom auf 400 mA erhöht wurde. Dann begann die Induktivität bei dem Eingangsstrom von 500 mA und darüber abzusinken.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Zerkhacker-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangsspannung 12 V und dessen Ausgangsspannung 5 V betrug. Der Gleichstromwandler besaß eine Schaltfrequenz von 500 kHz und konnte einen Laststrom von bis zu 400 mA ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 2 W, sein Wirkungsgrad betrug 80%.

Wie im Beispiel 13 wurde eine Vergleichs-Induktivität 13a hergestellt, wobei im Unterschied zum Beispiel 13 die amorphen magnetischen Bänder auf Co-Basis nach dem Ablöschverfahren nicht weiter bearbeitet wurden. Es wurde eine weitere planare Vergleichs-Induktivität 13b gemäß Beispiel 13 hergestellt, mit der Ausnahme, daß die amorphen magnetischen Bänder auf Co-Basis geglüht wurden, jedoch nicht in einem Magnetfeld. Die magnetischen Lagen der Induktivität 13a besaßen eine Permeabilität von 2000, während diejenigen der Induktivität 13b eine Permeabilität von 10 000 besaßen.

Die magnetischen Lagen beider Vergleichs-Induktivitäten hatten eindeutige magnetische Anisotropie.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie von Beispiel 13 und den Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b wurde gemessen. Die Vergleichs-Induktivität 13b hatte einen höheren Induktivitätswert als Beispiel 13. Allerdings blieb ihr Induktivitätswert nur konstant, bis der Gleichstrom auf 200 mA zu nahm, um anschließend oberhalb von 250 mA abzufallen. Andererseits war der Induktivitätswert der Vergleichs-Induktivität 13a niedriger als Beispiel 13, und er nahm bei kleinem Gleichstrom nach und nach ab. Beide, die Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b waren schlechter als Beispiel 13 hinsichtlich des Frequenzgangs. Insbesondere nahm ihr Leistungsverlust bei einer Frequenz von 100 kHz und darüber abrupt zu. Bei einer Frequenz von 1 MHz betrugen ihre Gütekoefizienten Q nur die Hälfte oder weniger als der Gütekoefizient Q des Beispiels 9.

Die Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b wurden als Ausgangs-Zerkhacker-Spule in Gleichstromwandlern desselben Typs verwendet. Diese Gleichstromwandler wurden getestet, um ihre maximale Ausgangsleistung und Wirkungsgrade zu testen. Ihre maximalen Lastströme waren auf etwa 200 mA begrenzt, unvermeidlich deshalb, weil die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivitäten 13a und 13b entgegenstand. Damit betrug ihre maximale Ausgangsleistung nur etwa die Hälfte der Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der

Induktivität gemäß Beispiel 13, und der Wirkungsgrad betrug lediglich 70% von demjenigen des Gleichstromwandlers nach Beispiel 13.

#### Beispiel 14

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte, und der spiralförmigen Spule in der Induktivität gemäß Beispiel 13 ähnelte. Die Sekundärspule war letzterer identisch, mit der Ausnahme, daß sie zehn Windungen besaß. Die Sekundärspule wurde auf einer die Primärspule abdeckenden Isolierschicht ausgebildet. Die Induktivität der Primärspule dieses Transformators zeigte eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 13.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Weiterhin wurde die planare Induktivität gemäß Beispiel 13 als Ausgangs-Drosselspule in dem Vorwärts-Gleichstromwandler verwendet. Der Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seines Frequenzgangs getestet. Seine Schaltfrequenz betrug 500 kHz. Das Nenn-Ausgangssignal war ähnlich wie bei dem Gleichstromwandler, dessen Ausgangs-Drosselwelle die Induktivität gemäß Beispiel 13 bildete. Im Ergebnis trug der Transformator zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler bei.

Es wurden zwei planare Vergleichstransformatoren hergestellt. Der erste Vergleichstransformator war identisch dem Transformator nach Beispiel 14, mit der Ausnahme, daß die selben Magnetschichten wie bei jenen in der Induktivität des Vergleichsbeispiels 13a eingebaut wurden. Dieser zweite Vergleichstransformator war identisch dem Beispiel 14, mit der Ausnahme, daß die gleichen magnetischen Filme wie bei der Vergleichs-Induktivität 13b eingebaut wurden. Diese planaren Vergleichs-Transformatoren wurden getestet. Ihre Primärspulen-Induktivitätswerte waren ähnlich denjenigen der planaren Vergleichs-Induktivitäten 13a beziehungsweise 13b.

Diese planaren Vergleichs-Transformatoren wurden in Gleichstromwandlern des oben beschriebenen Typs eingebaut. Ihre Kennwerte wurden geprüft. Die Ergebnisse offenbarten, daß keiner der Gleichstromwandler eine normale Leistungsumwandlung vollziehen konnte, weil der planare Vergleichs-Transformator magnetisch gesättigt war.

#### Beispiel 15

Eine planare Induktivität des in Fig. 35 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung wurde folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet wurde. Dann wurde auf dieser SiO<sub>2</sub>-Schicht in einem 100 Oe starken Magnetfeld mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur eine amorphe CoZrNb-Magnetschicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Diese CoZrNb-Schicht besaß eine uniaxiale magnetische Anisotropie und besaß ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde auf der magnetischen Schicht durch Plasma-CVD oder HR-Zerstäubung eine 500 nm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Drei weitere CoZrNb-Schichten sowie drei weitere SiO<sub>2</sub>-Schichten wurden nach demselben Verfahren hergestellt, um eine Mehrschichtstruktur zu erhalten, die aus vier Magnetschichten und vier Isolierschichten bestand, die abwechselnd angeordnet waren. Die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht hatte eine Dicke von 1 µm. Jede der benachbarten beiden magnetischen Schichten war so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich rechtwinklig schnitten.

Dann wurde auf der obersten SiO<sub>2</sub>-Schicht eine 10 µm dicke Al-0,5%Cu-Schicht erzeugt, in einem Fall durch eine Gleichstrom Magnetron-Zerstäubungsapparatur, im anderen Fall durch eine Ultrahochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der Al-0,5%Cu-Schicht wurde eine 1,5 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht. Im Schleuderverfahren wurde auf diese SiO<sub>2</sub>-Schicht ein Positiv-Resistmaterial aufgebracht und durch Fotolithografie mit einem spiralförmigen Muster versehen. Mit Hilfe des spiralförmigen Fotoresistmusters als Maske wurde CF<sub>4</sub>-Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um so durch reaktives Ionenätzen die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht zu bearbeiten. Weiterhin wurden auf die Struktur Cl<sub>2</sub>-Gas sowie BCl<sub>3</sub>-Gas aufgebracht, um die Al-0,5%Cu-Schicht durch reaktives Ionenätzen zu bearbeiten. Letztere Schicht wurde dann geätzt, um eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen zu erhalten, wobei die Breite der Leiter 100 µm und der Lückenabstand zwischen den Windungen 5 µm betrug. Durch Schleuderguß wurde auf die Oberfläche dieser Struktur eine Polyamidsäurelösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, aufgebracht, um eine 15 µm dicke Schicht zu bilden und die Lücken zwischen den Windungen der Spule auszufüllen.

Diese Schicht wurde bei 350°C erhärtet, so daß sich eine Polyimidschicht bildete. Auf diese Struktur wurde CF<sub>4</sub>-Gas und O<sub>2</sub>-Gas geleitet, um durch reaktives Ionenätzen der Polyimidschicht deren Dicke auf 1 µm zu bringen, gemessen, von der Oberseite des Spulenleiters aus.

Anschließend wurden abwechselnd vier Isolierschichten und vier magnetische Schichten übereinander gebildet, wobei das oben erläuterte Verfahren verwendet wurde. Jeweils zwei benachbarte Magnetschichten wurden so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich unter einem rechten Winkel schnitten, ähnlich wie bei den Schichten unterhalb der spiralförmigen planaren Spule.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurde jede magnetische Schicht wiederholt erhitzt und abgekühlt, blieb jedoch wärmebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft blieb tatsächlich auch nach der Fertigstellung der Induktivität unverändert. In anderen Worten: die während der Produktion auf die Induktivität aufgebrachte Wärme hatte nur einen extrem geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der magnetischen Schichten.

Die elektrischen Eigenschaften und Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert L von 2 µH und einen Gütekoeffizienten Q von 15 (bei 5 MHz).

Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie geprüft, und ihr Induktivitätswert blieb konstant, bis der Überlagerungs-Gleichstrom auf 150 mA erhöht wurde. Von dort an nahm bei einer Erhöhung des Überlagerungs-Gleichstroms auf 200 mA der Wert ab.

Diese planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Chopper-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Der Gleichstromwandler konnte einen Laststrom von bis zu 150 mA bei einer Schaltfrequenz von 4 MHz ausgeben. Die maximale Ausgangsleistung betrug 0,75 W, der Wirkungsgrad betrug 70%.

Es wurde eine weitere planare Induktivität gefertigt, die mit der oben beschriebenen Induktivität mit der Ausnahme identisch war, daß die die Lücken füllende Isolierschicht zwischen den Spulenwindungen nicht aus Polyimid, sondern aus  $\text{SiO}_2$  bestand und entweder mittels CVD-Verfahren oder durch Vorspannungs-Zerstäuben hergestellt wurde. Diese planare Induktivität zeigte ähnliche elektrische Eigenschaften wie die oben beschriebene Induktivität.

Nach dem gleichen Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 15, wurde eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt, mit dem Unterschied, daß die amorphen Magnetschichten aus CoZrNb nicht in einem magnetischen Feld gebildet wurden. Jeder der so hergestellten magnetischen Schichten zeigte eine Permeabilität von 10 000 und zeigte unzweideutig magnetische Anisotropie. Die Vergleichsinduktivität hatte einen Induktivitätswert, der etwa fünfmal höher war als bei der Induktivität nach Beispiel 15. Dieser Induktivitätswert war jedoch nur bis zu einem Gleichstromanstieg bis 10 mA konstant. Er nahm stark ab, wenn ein Strom von 20 mA oder mehr dem Eingangs-Gleichstrom überlagert wurde.

Die planare Vergleichsinduktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem Gleichstromwandler desselben Typs wie im Beispiel 15 eingebaut. Der Gleichstromwandler mit dieser Vergleichsinduktivität wurde getestet. Er besaß einen maximalen Laststrom von etwa 10 mA aufgrund der schlechten Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Vergleichsinduktivität. Diese maximale Ausgangsleistung betrug ein Zehntel oder weniger der maximalen Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 15.

#### Beispiel 16

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte und identisch der spiralförmigen planaren Spule der Induktivität nach Beispiel 15 war, während die Sekundärspule mit der Ausnahme identisch war, daß sie zehn Windungen besaß und auf einer Polyimid-Isolierschicht mit einer Dicke von 2  $\mu\text{m}$  ausgebildet war und die Primärspule bedeckte. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Transformators ergab eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die etwa die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 15.

Der planare Transformator wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Weiterhin wurde die Induktivität nach Beispiel 15 als Ausgangs-Drosselspule in dem Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingesetzt. Der Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennlinien untersucht. Seine Ausgangs-Nennleistung war vergleichbar mit der des Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 15. Da sämtliche magnetischen Elemente des Wandlers planar waren, konnte der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler sehr klein und leichtgewichtig ausgeführt werden.

Ein planarer Vergleichstransformator wurde nach dem Verfahren des Beispiels 16 hergestellt, wobei lediglich die amorphen Magnetfilme aus CoZrNb nicht in magnetische Felder ausgebildet wurden. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses planaren Transformators war im wesentlichen der gleiche wie bei der Induktivität, die zu Vergleichszwecken mit der Induktivität nach Beispiel 15 hergestellt wurde. Der Vergleichstransformator wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler des oben beschriebenen Typs eingebaut. Als dieser Gleichstromwandler getestet wurde, floß ein exzessiver Spitzenstrom durch die Leistungsschalter-MOSFETs in den Wandler, und zwar aufgrund der Tatsache, daß der planare Vergleichstransformator magnetisch gesättigt war. Der Spitzenstrom brachte die MOSFETs zum Durchbruch.

#### Beispiel 17

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde auf einer 30  $\mu\text{m}$  dicken ersten Polyimid-Schicht eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie haftend angebracht. Die Kupferfolie wurde durch Naßätzen mit einem Muster einer rechtwinkligen, spiralförmigen und planaren Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einem Windungsabstand von 100  $\mu\text{m}$  versehen. Eine zweite Polyimid-Schicht mit einer Dicke von 10  $\mu\text{m}$  wurde auf der planaren Spule ausgebildet. Damit war die planare Spule sandwichartig zwischen der ersten und der zweiten Polyimid-Schicht eingefafßt.

Die resultierende Struktur wurde zwischen zwei rechtwinkligen Magnetschichten eingefafßt. Jede Magnetschicht war in Form von vier gleichschenkligen Dreiecken aus amorphen magnetischen Filmen auf Co-Basis mit einer Grundlinienlänge von 12 mm und einer Höhe von 6 mm ausgebildet. Jede dieser dreieckigen Magnetschichten war hergestellt worden, indem eine amorphe Magnetschicht auf Co-Basis nach dem Schnell-Ablöschverfahren unter Verwendung einer Einzelwalze gebildet wurde und diese amorphe magnetische Schicht in einem Magnetfeld von 200 Oe gegläht wurde, welche sich parallel zu der Grundlinie der dreieckförmigen Schicht erstreckte. Die magnetischen Schichten besaßen ein anisotropes Magnetfeld von 20 Oe, eine Koerzitivkraft von 0,01 Oe entlang der Achse schwerer Magnetisierung, eine Permeabilität von 5000 entlang der Achse der schweren Magnetisierung, und eine magnetische Sättigungsflußdichte von 10 kG. Die so hergestellte planare Induktivität hatte eine Breite von 12 mm.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität wurde ermittelt. Der Induktivitätswert der Induktivität blieb unverändert bei 12,5  $\mu\text{H}$ , bis der Eingangsstrom auf 200 mA anstieg. Er begann abzunehmen, als der Eingangsstrom 250 mA oder mehr betrug.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärts transformierenden Zerkhack-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Der Gleichstromwandler besaß eine Schaltfrequenz von 500 kHz und konnte einen Laststrom von bis zu 200 mA ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 1 W, sein Wirkungsgrad betrug 80%.

Nach dem Verfahren gemäß dem Beispiel 17 wurde eine planare Vergleichsinduktivität 17a hergestellt, die lediglich von dem Beispiel 17 insoweit abwich, als die amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis nach dem Abkühlen im Schmelzbad nicht weiterbearbeitet wurden. Es wurde eine weitere planare Induktivität 17b nach dem gleichen Verfahren wie im Beispiel 17 hergestellt, mit der Ausnahme, daß die amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis zwar wärmebehandelt (geglüht) wurden, nicht jedoch in einem Magnetfeld. Die magnetischen Schichten der Induktivität 17a hatten eine Permeabilität von 2000, während diejenigen der Induktivität 17b eine Permeabilität von 10 000 besaßen.

Die magnetischen Schichten keiner der Vergleichsinduktivitäten zeigten eindeutige magnetische Anisotropie.

Es wurden die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinien des Beispiels 17 und der Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b gemessen. Die Vergleichsinduktivität 17b hatte einen höheren Induktivitätswert als das Beispiel 17. Allerdings blieb der Induktivitätswert nur bis zu einem Anstieg des Stroms auf 100 mA konstant, und fiel dann bei einem Gleichstrom von mehr als 120 mA stark ab. Andererseits war der Induktivitätswert der Vergleichsinduktivität 17a niedriger als beim Beispiel 17, er begann bei einem geringen Gleichstrom allmählich abzufallen. Beide Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b waren schlechter als das Beispiel 17 auch bezüglich des Frequenzgangs. Speziell nahmen ihre Leistungsverluste bei Frequenzen von 100 kHz und darüber abrupt zu. Bei der Frequenz von 1 MHz betrug ihr Güteeffizient  $Q$  nur halb soviel oder weniger wie der Güteeffizient  $Q$  des Beispiels 13.

Die Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b wurden als Ausgangs-Drosselspule in Gleichstromwandlern desselben Typs verwendet. Die Gleichstromwandler wurden getestet, um ihre maximale Ausgangsleistung und ihren Wirkungsgrad zu ermitteln. Die maximalen Lastströme waren begrenzt auf etwa 100 mA, und zwar unvermeidlich deshalb, weil die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinien der Induktivitäten 17a und 17b so schlecht war. Damit betrug die maximale Ausgangsleistung etwa die Hälfte der Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 17, und der Wirkungsgrad betrug lediglich 70% von dem Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers nach Beispiel 17.

#### Beispiel 18

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte, und identisch mit der spiralförmigen planaren Spule der Induktivität nach Beispiel 17 war. Die Sekundärspule war identisch ausgebildet, und nach dem gleichen Verfahren wie Beispiel 17 auf einer die Primärspule abdeckenden Isolierschicht hergestellt, mit der Ausnahme, daß die Sekundärwicklung zehn Windungen besaß. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Transformators entsprach einer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war, wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 17.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrug. Die planare Induktivität nach Beispiel 5 wurde als Ausgangs-Drosselspule in dem Gleichstromwandler eingesetzt. Der Vorwärts-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennwerte getestet. Beim Betrieb mit einer Schaltfrequenz von 500 kHz zeigte der Transformator eine Ausgangs-Nennleistung, die mit derjenigen des abwärts transformierenden Zerkhack-Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 17 vergleichbar war. Offensichtlich trägt der Transformator nach Beispiel 17 zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler bei.

Es wurde ein planarer Vergleichstransformator mit dem gleichen Aufbau wie Beispiel 17 hergestellt, mit der Ausnahme, daß seine magnetischen Schichten von dem Typ waren, wie sie in der Vergleichsinduktivität 17a eingebaut wurden. Es wurde ein weiterer planarer Vergleichstransformator hergestellt, dessen Aufbau mit der Struktur des Beispiels 17 identisch war, mit der Ausnahme, daß die magnetischen Schichten von dem in die Vergleichsinduktivität 17b eingebauten Typ waren. Die Induktivitätswerte der Primärspule beider Vergleichstransformatoren 18' waren im wesentlichen die gleichen wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 17. Die Vergleichstransformatoren 19' wurden eingebaut in Vorwärts-Gleichstromwandler desselben Typs, der den Transformator gemäß Beispiel 18 enthielt. Beim Test konnten diese Gleichstromwandler keine normale Leistungsumsetzung bewirken, weil die Komponenten der Transformatoren magnetisch gesättigt waren.

#### Beispiel 19

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet wurde. Auf diese Schicht wurde ein Negativ-Fotoresistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht. Das Fotoresistmaterial wurde fotolithografisch behandelt, um zwei Öffnungen in dem Fotoresistmaterial auszubilden. Diese Öffnungen hatten die Form von gleichschenkligen Dreiecken, die mit ihren Scheiteln einander berührten und jeweils eine Grundlinie von 5 mm und eine Höhe von 2,5 mm besaßen. Anschließend wurde eine 1  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  gebildet, die teilweise auf dem Fotoresistmaterial und teilweise auf den freiliegenden Bereichen der  $\text{SiO}_2$ -Schicht lag (letztere jeweils in der



Form des gleichschenkligen Dreiecks). Die magnetische Schicht wurde in einem Magnetfeld von 100 Oe mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur gebildet. Es ergab sich eine uniaxiale magnetische Anisotropie, und man erhielt ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde das Fotoresistmaterial mit einem Lösungsmittel gelöst und von der  $\text{SiO}_2$ -Schicht entfernt. Demzufolge wurde derjenige Abschnitt der magnetischen Schicht, der auf dem Fotoresistmaterial ausgebildet war, abgehoben, und es wurden zwei amorphe magnetische Schichten aus  $\text{CoZrNb}$  in Form gleichschenkliger Dreiecke auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht ausgebildet.

Anschließend wurde ein Fotoresistmaterial auf der Oberseite dieser Struktur im Schleuderverfahren aufgebracht. Dieses Fotoresistmaterial wurde fotolithografisch behandelt, um zwei Öffnungen zu bilden. Die Öffnungen hatten die Form gleichschenkliger Dreiecke, die sich mit ihren Scheiteln berührten und jeweils eine Grundlinie von 5 mm und eine Höhe von 2,5 mm aufwiesen. Ihre Orientierung war so, daß sich ihre Achsen unter rechtem Winkel zu den Achsen der bereits auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildeten amorphen magnetischen Schichten aus  $\text{CoZrNb}$  erstreckten. Danach wurde eine 1 µm dicke amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  gebildet, teilweise auf dem Fotoresistmaterial und teilweise auf den freiliegenden Bereichen (jeweils in Form eines gleichschenkligen Dreiecks) der  $\text{SiO}_2$ -Schicht. Die magnetische Schicht wurde in einem Magnetfeld von 100 Oe mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur gebildet. Es zeigte sich eine uniaxiale magnetische Anisotropie sowie ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Danach wurde das Fotoresist-Material mit einem Lösungsmittel gelöst und von der  $\text{SiO}_2$ -Schicht entfernt. Die Folge war, daß derjenige Abschnitt der magnetischen Schicht, der auf dem Fotoresistmaterial lag, abgehoben wurde, während die zwei anderen amorphen magnetischen Schichten aus  $\text{CoZrNb}$ , jeweils in Form eines gleichschenkligen Dreiecks, auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht aus gebildet waren.

Im Ergebnis wurde auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine quadratische, amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  ausgebildet, bestehend aus vier dreieckigen Magnetschichten, deren Seiten jeweils 5 mm lang waren. Jede der vier dreieckigen magnetischen Schichten besaß eine Achse der leichten Magnetisierung, die sich entlang ihrer Grundlinie erstreckte.

Weiterhin wurde eine 1,5 µm dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht durch Plasma-CVD oder HF-Zerstäubung auf der magnetischen Schicht gebildet. Auf der obersten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde eine 10 µm dicke  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht gebildet, und zwar wahlweise durch eine Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder eine Hochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht wurde eine 1,5 µm dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Auf dieser Schicht wiederum wurde ein Positiv-Resistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht. Mittels Fotolithografie wurde das Fotoresistmaterial mit einem Muster einer quadratischen Spiralform versehen, deren Seiten mit denjenigen der quadratischen, amorphen Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  ausgerichtet waren. Unter Verwendung des Fotoresistmaterials als Maske wurde  $\text{CF}_4$ -Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um durch reaktives Ionenätzen die oberste  $\text{SiO}_2$ -Schicht zu bearbeiten. Weiterhin wurden  $\text{Cl}_2$ -Gas und  $\text{BCl}_3$ -Gas auf die Struktur aufgebracht, um die  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht mittels reaktivem Ionenätzen zu bearbeiten. Die letztgenannte Schicht wurde dabei so geätzt, daß eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100 µm und einem Zwischenwindungsabstand von 5 µm entstand. Eine Polyamid-Säure-Lösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, wurde im Schleuderverfahren auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um eine 15 µm dicke Schicht zu bilden, in der die Lücken zwischen den Windungen der Spule ausgefüllt wurden. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet und bildete dann eine Polyimidschicht. Auf diese Struktur wurde  $\text{CF}_4$ -Gas sowie  $\text{O}_2$ -Gas aufgebracht, um die Polyimidschicht einem reaktiven Ionenätzen zu unterziehen bis zu einer Schichtdicke von 1 µm, gemessen von der Oberseite des Spulenleiters.

Als nächstes wurde eine der ersten amorphen magnetischen Schicht identische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  auf der Polyimidschicht gebildet, und zwar mit dem oben erläuterten Verfahren. Es ergab sich eine planare Induktivität mit dem in Fig. 36 dargestellten Aufbau. Während der Herstellung der Induktivität wurde die untere magnetische Schicht erhitzt und abgekühlt, sie blieb jedoch hitzebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft hat sich praktisch nach der Herstellung der Induktivität nicht verändert. In anderen Worten: Während des Produktionsvorgangs auf die Induktivität aufgetragene Wärme hat allenfalls einen sehr geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der unteren magnetischen Schicht.

Die elektrischen Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert  $L$  von 2 µH und einen Gütekoeffizienten  $Q$  von 15 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet. Ihr Induktivitätswert blieb konstant bis zu einem Überlagerungs-Gleichstrom von 80 mA, und fiel dann ab, wenn der Überlagerungs-Gleichstrom auf 100 mA erhöht wurde.

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs hergestellt, dessen Aufbau mit dem oben erläuterten Aufbau identisch war, mit der Ausnahme, daß die die Lücken ausfüllende Isolierschicht zwischen den Spulenwindungen nicht aus Polyimid sondern aus  $\text{SiO}_2$  bestand, wobei entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren angewandt wurde. Diese planare Induktivität zeigte elektrische Kennwerte ähnlich denjenigen der oben beschriebenen planaren Induktivität.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betragen. Der Gleichstromwandler konnte einen Laststrom von bis zu 80 mA bei einer Schaltfrequenz von 4 MHz ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 0,4 W, sein Wirkungsgrad betrug 70%.

Nach dem gleichen Verfahren wie beim Beispiel 19 wurde eine planare Vergleichs-Induktivität hergestellt, lediglich mit dem Unterschied, daß die amorphen magnetischen Schichten  $\text{CoZrNb}$  nicht in einem magnetischen Feld ausgebildet wurden. Jede so ausgebildete magnetische Schicht zeigte eine Permeabilität von 10 000 und hatte eindeutig eine magnetische Anisotropie. Die Vergleichs-Induktivität hatte einen Induktivitätswert, der etwa fünfmal so hoch war wie derjenige der Induktivität nach Beispiel 15. Diese Induktivität jedoch blieb nur bis zu einem Gleichstrom von etwa 8 mA konstant. Sie begann abzufallen, wenn der Strom von 10 mA oder ein



höherer Strom dem Eingangs-Gleichstrom überlagert war.

Die planare Vergleichs-Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem Gleichstromwandler desselben Typs wie die Induktivität nach Beispiel 19 eingesetzt. Der die Vergleichs-Induktivität enthaltende Gleichstromwandler wurde getestet. Sein maximaler Laststrom betrug etwa 8 mA, was auf die schlechte Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Vergleichs-Induktivität zurückzuführen war. Unvermeidlich betrug die maximale Ausgangsleistung nur ein Zehntel und weniger der maximalen Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 19.

#### Beispiel 20

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen aufwies und identisch der spiralförmigen Spule der Induktivität nach Beispiel 19 war, während die Sekundärspule identisch ausgebildet war, mit der Ausnahme, daß sie zehn Windungen besaß und auf einer Polyimidschicht mit einer Dicke von 2 µm ausgebildet war und die Primärspule abdeckte. Die Induktivität der Primärspule dieses Transformators besaß eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 19.

Der planare Transformator wurde in einen Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrug. Die planare Induktivität nach Beispiel 19 wurde außerdem als Ausgangs-Drosselspule in dem Gleichstromwandler eingesetzt. Der Vorwärts-Gleichstromwandler wurde bezüglich seiner Kennwerte getestet. Der Transformator zeigte eine Ausgangs-Nennleistung, die vergleichbar war mit derjenigen des Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 19. Offensichtlich trug der Transformator nach Beispiel 20 zu der Miniaturisierung der isolierten Gleichstromwandler bei.

Es wurde ein planarer Vergleichstransformator hergestellt, dessen Aufbau identisch dem Beispiel 20 war, mit der Ausnahme, daß seine magnetischen Schichten von dem Typ waren, der in die Induktivität eingesetzt war, die zum Vergleich mit dem Beispiel 19 hergestellt wurde. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Vergleichstransformators war im wesentlichen der gleiche wie der bei der planaren Induktivität nach Beispiel 19. Der Vergleichstransformator wurde in die Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler desselben Typs eingebaut, der auch den Transformator nach Beispiel 20 enthielt. Als dieser Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler geprüft wurde, floß ein übermäßig starker Spitzenstrom durch die Leistungsschalter-MOSFETs, die in dem Wandler verwendet werden, und zwar deshalb, weil der planare Vergleichstransformator magnetisch gesättigt war. Der Spitzenstrom brachte die MOSFETs zum Durchbruch.

#### Beispiel 21

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 38 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt.

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine 1 µm SiO<sub>2</sub>-Schicht entstand, auf der ein Positiv-Fotoresistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht wurde. Das Fotoresistmaterial wurde mit einem Muster versehen, welches mehreren rechtwinkligen konzentrischen Nuten entsprach. Unter Verwendung des mit einem Muster versehenen Fotoresistmaterials als Maske erfolgte ein reaktives Ionenätzen des SiO<sub>2</sub> durch Aufbringen von CF<sub>4</sub>-Gas. Hierdurch erhielt die SiO<sub>2</sub>-Schicht rechtwinklige konzentrische Nuten mit einer jeweiligen Breite von  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 0,5 \mu\text{m}$ . Die Lücke  $L$  zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten betrug 4 µm. Dann wurde das Fotoresistmaterial entfernt.

Als nächstes wurde auf der mit Nuten versehenen SiO<sub>2</sub>-Schicht mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur bei Drehung des Siliciumsubstrats eine 2 µm dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet. Diese magnetische Schicht wurde ohne magnetische Felder ausgebildet, und es erhielt die amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb keine Anisotropie außer der durch die Form bedingten Anisotropie. (Unter denselben Zerstäubungsbedingungen wurde auf der glatten SiO<sub>2</sub>-Schicht, die durch thermische Oxidation entstanden war und eine glatte Oberfläche besaß, eine amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet. In dem Teil der magnetischen Schicht, der sich im Drehmittelpunkt befand, ließ sich praktisch keine magnetische Anisotropie feststellen.) Da die magnetische Schicht auf der mit Nuten versehenen SiO<sub>2</sub>-Schicht ausgebildet wurde, hatte sie mehrere rechtwinklige konzentrische Vorsprünge auf ihrer Unterseite. Diese magnetische Schicht wurde als untere magnetische Schicht verwendet.

Anschließend wurde auf der magnetischen Schicht durch Plasma-CFV oder HF-Zerstäubung eine 500 nm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht. Auf der obersten SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde mittels einer Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder einer Hochvakuum-Aufdampfapparatur eine 10 µm dicke Al<sub>0,5</sub>%Cu-Schicht aufgebracht. Auf letzterer wurde eine 1,5 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Auf diese SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde eine Positiv-Fotoresistmaterial-Schicht im Schleuderverfahren aufgebracht und durch Fotolithografie mit einem Muster versehen, um eine Spiralförmigkeit zu erhalten. Unter Verwendung des spiralförmigen Fotoresistmaterials als Maske wurde CF<sub>4</sub>-Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um durch reaktives Ionenätzen die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht zu bearbeiten. Weiter wurde auf die Struktur Cl<sub>2</sub>-Gas und BCl<sub>3</sub>-Gas aufgebracht, um die Al<sub>0,5</sub>%Cu-Schicht mittels reaktivem Ionenätzen zu behandeln. Letztgenannte Schicht wurde dadurch so geätzt, daß eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen einer Leiterbreite von 100 µm und einem Zwischenwindungs-Abstand von 5 µm entstand. Dann wurde auf diese Struktur eine Polyamidsäure-Lösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, im Schleuderverfahren auf die Oberfläche aufgebracht, wodurch eine 15 µm dicke Schicht entstand und die Lücken zwischen den Spulenwindungen ausgefüllt wurden. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet, so daß die Polyimidschicht entstand. Auf diese Struktur wurde CF<sub>4</sub>-Gas und O<sub>2</sub>-Gas aufgebracht,

um die Polyimidschicht durch reaktives Ionenätzen auf eine Dicke von 1  $\mu\text{m}$  zu reduzieren, gemessen von der Oberseite des Spulenleiters.

Auf der Polyimidschicht wurde mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur eine 2,5  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb ausgebildet, dann wurde im Schleuderverfahren auf letztgenannte Schicht eine Schicht aus Positiv-Fotoresistmaterial aufgebracht, welches mit einem Muster aus mehreren rechtwinkligen konzentrischen Nuten versehen wurde. Unter Verwendung des mit dem Muster versehenen Fotoresistmaterials als Maske erfolgte ein reaktives Ionenätzen der magnetischen Schicht aus CoZrNb durch Aufbringen von  $\text{Cl}_2$ -Gas und  $\text{BCl}_3$ -Gas. Demzufolge erhielt die magnetische Schicht rechtwinklige, konzentrische Nuten mit jeweils einer Breite von  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 0,5 \mu\text{m}$ . Die Lücke L zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten betrug 4  $\mu\text{m}$ . Diese magnetische Schicht wurde als obere magnetische Schicht verwendet.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurde die untere magnetische Schicht wiederholt erwärmt und abgekühlt, sie blieb jedoch wärmebeständig. Ihre magnetischen Eigenschaften blieben praktisch unverändert nach der Herstellung der Induktivität erhalten. In anderen Worten: die während der Produktion der Induktivität aufgebrachte Wärme hatte allenfalls einen sehr geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der unteren magnetischen Schicht.

Die elektrischen Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert L von 0,8  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten Q von 7 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet, wobei sich zeigte, daß der Induktivitätswert bis zu einem Überlagerungs-Gleichstrom von 300 mA konstant blieb und dann abfiel, als der Überlagerungs-Gleichstrom auf 350 mA anstieg.

In der  $\text{SiO}_2$ -Schicht, auf der die untere magnetische Schicht ausgebildet war, und in der oberen magnetischen Schicht wurden konzentrische Nuten ausgebildet, und zwar nach einem anderen Verfahren als dem der Fotolithografie. Hier empfiehlt sich eine Mikro-Oberflächenbearbeitung (spanabhebende Bearbeitung), bei der Nuten in die  $\text{SiO}_2$ -Schicht und die obere magnetische Schicht geschnitten werden. Im Beispiel 21 werden konzentrische Nuten in lediglich einer Oberfläche der  $\text{SiO}_2$ -Schicht und in lediglich einer Oberfläche der oberen magnetischen Schicht ausgebildet. Stattdessen kann man auch beide Oberflächen bearbeiten.

Die magnetischen Schichten, nämlich sowohl die obere als auch die untere magnetische Schicht, können aus einem magnetischen Isolierstoff bestehen, wie beispielsweise einem Weichferrit. In diesem Fall kann jede magnetische Schicht direkt auf der planaren Spule angeordnet sein, während die Spule als Form zur Ausbildung einer Spiralnute in jeder der magnetischen Schichten dient.

Es wurde eine weitere planare Induktivität hergestellt, die den gleichen Aufbau besaß, wie er oben beschrieben wurde, mit der Ausnahme, daß die die Lücken zwischen den Spulenwindungen ausfüllende Isolierschicht nicht Polyimid, sondern  $\text{SiO}_2$  war. Hierzu wurde entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren angewendet. Diese planare Induktivität hatte ähnliche elektrische Eigenschaften wie die oben beschriebene planare Induktivität.

Nach demselben Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, wurde eine planare Vergleichs-Induktivität 21a hergestellt, die sich von der vorgenannten Induktivität nur dadurch unterschied, daß weder die untere  $\text{SiO}_2$ -Schicht, noch die obere CoZrNb-Schicht mit Nuten versehen wurde.

Außerdem wurde nach demselben Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, eine planare Vergleichs-Induktivität 21b hergestellt, wobei der Unterschied darin bestand, daß die untere  $\text{SiO}_2$ -Schicht und die obere CoZrNb-Schicht mit einem Muster versehen wurden, um auf diese Weise recht winklige konzentrische Nuten mit jeweils einer Breite  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 1 \mu\text{m}$  zu bilden, wobei der Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten  $L = 20 \mu\text{m}$  betrug. Die Bemessungen der in der oberen magnetischen Schicht gebildeten Nuten erfüllen nicht die Ungleichung (5).

Wenngleich beide Vergleichs-Induktivitäten 21a und 21b einen Induktivitätswert besaßen, der achtmal so groß war wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, so nahm der Induktivitätswert jedoch sehr rasch ab, sobald der überlagernde Gleichstrom eine Stärke von 10 mA oder mehr besaß.

#### Beispiel 22

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung, welches dem in Fig. 43 dargestellten Typ entspricht, nach folgendem Verfahren hergestellt: Zunächst wurde an einer 40  $\mu\text{m}$  dicken ersten Polyimidschicht eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie haftend angebracht, die dann durch chemisches Naßätzen mit einem Muster einer spiralförmigen planaren Spule versehen wurde. Diese Spule war rechtwinklig, hatte 20 Windungen, eine Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einen Abstand zwischen den Windungen von 100  $\mu\text{m}$ . Dann wurde auf der spiralförmigen planaren Spule eine 30  $\mu\text{m}$  dicke zweite Polyimidschicht gebildet. Auf der ersten und der zweiten Polyimidschicht wurden jeweils zwei 15  $\mu\text{m}$  dicke, amorphe Legierungsfolien auf Co-Basis aufgebracht. Im Ergebnis schlossen die erste und die zweite Polyimid schicht die Spule sandwichartig zwischen sich ein, und die Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis schlossen die Spule und die Polyimidschichten zusammen zwischen sich ein. Beide Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis besaßen eine Permeabilität von 5000 entlang ihrer Magnetisierungsachse und eine Sättigungsflußdichte von 10 kG. Sie wurden hergestellt nach dem Verfahren des raschen Ablöschens unter Verwendung einer Einzelwalze und durch Wärmebehandlung dieser Schichten in einem Magnetfeld. Jede der Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis hatte aufgrund der Wärmebehandlung eine uniaxiale magnetische Anisotropie, und es zeigte sich ein anisotropes Magnetfeld 20 Oe.

Dann wurde die aus der Spule, den beiden Polyimidschichten und den zwei Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis bestehende Struktur zwischen zwei weiteren Polyimidschichten mit einer jeweiligen Schichtdicke von

5 µm sandwichartig eingeschlossen. Demzufolge ergab sich eine planare Induktivität mit einer Größe von 5 mm × 10 mm. Deren Induktivitätswert betrug 12,5 µH. Der Induktivitätswert blieb konstant, bis der Gleichstrom auf 400 mA erhöht wurde, und er begann abzufallen, als der Gleichstrom auf 500 mA erhöht wurde.

#### Beispiel 23

5

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule identisch der in der Induktivität nach Beispiel 22 enthaltenen Spule war, und dessen Sekundärspule mit dieser identisch war, mit der Ausnahme, daß sie 10 Windungen und nicht 20 Windungen besaß. Der Transformator war im Aufbau identisch zu der Induktivität nach Beispiel 22, mit der Ausnahme, daß die Sekundärspule vorhanden war. Der Transformator wurde getestet und zeigte eine ähnliche Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie wie die planare Induktivität nach Beispiel 22.

10

#### Beispiel 24

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 35 dargestellten Typs gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt:

15

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, um eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht zu bilden, auf der in einem Magnetfeld von 100 Oe mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur anschließend eine 1 µm dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet wurde. Diese Schicht zeigte eine uniaxiale magnetische Anisotropie und ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde mittels Plasma-CVD oder HF-Zerstäubung auf der magnetischen Schicht eine 500 Å dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Es wurden drei weitere CoZrNb-Schichten und drei weitere SiO<sub>2</sub>-Schichten nach demselben Verfahren hergestellt, so daß eine Mehrschichtstruktur entstand, die aus vier magnetischen Schichten und vier Isolierschichten bestand, die alternierend übereinander angeordnet waren. Vier Magnetschichten waren so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung miteinander ausgerichtet waren.

20

25

Dann wurde auf der obersten SiO<sub>2</sub>-Schicht eine 10 µm dicke Al-0,5%Cu-Schicht ausgebildet, entweder mittels einer Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder einer Hochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der Al-0,5%Cu-Schicht wurde eine 1,5 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Im Schleuderverfahren wurde auf dieser SiO<sub>2</sub>-Schicht eine Positiv-Fotoresistmaterial-Schicht aufgebracht und mittels Fotolithografie mit einem spiralförmigen Muster versehen. Unter Verwendung des spiralförmigen Fotoresistmaterials als Maske wurde CF<sub>4</sub>-Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht durch reaktives Ionenätzen zu bearbeiten. Außerdem wurde auf die Struktur Cl<sub>2</sub>-Gas und BCl<sub>3</sub>-Gas aufgebracht, um die Al-0,5%Cu-Schicht einer reaktiven Ionenätzung auszusetzen. Letztgenannte Schicht wurde dabei unter Bildung zweier spiralförmiger planarer Spulen geätzt, welche in ihrer Hauptachse miteinander ausgerichtet waren, jeweils 20 Windungen, eine Leiterbreite von 100 µm und einen Windungsabstand von 5 µm besaßen.

30

35

Auf die Oberfläche dieser Struktur wurde im Schleuderverfahren eine Polyamidsäurelösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, aufgebracht, um eine 15 µm dicke Schicht zu bilden, welche die Lücken zwischen den Windungen der Spule ausfüllt. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet zu einer Polyimidschicht. Auf diese Struktur wurde CF<sub>4</sub>-Gas und O<sub>2</sub>-Gas aufgebracht, um die Polyimidschicht durch reaktives Ionenätzen auf eine Dicke von 1 µm zu bringen, gemessen an der Oberseite des Spulenleiters.

40

Anschließend wurden übereinander vier Isolierschichten und vier magnetische Schichten nach dem oben beschriebenen Verfahren gebildet.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurden die vier magnetischen Schichten unterhalb der Spulen wiederholt erhitzt und abgekühlt, sie blieben jedoch wärmebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft blieb nach der Herstellung der Induktivität praktisch unverändert. In anderen Worten: die während der Herstellung der Induktivität aufgebrachte Wärme hatte allenfalls einen extrem geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der magnetischen Filme unterhalb der Spulen. Die elektrischen Eigenschaften der so hergestellten Induktivität wurden ermittelt: Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert L von 2 µH und einen Gütekoeffizienten Q von 15 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet, wobei ihr Induktivitätswert konstant blieb bis zu einer Zunahme des Überlagerungs-Gleichstroms auf 150 mA, wobei sich eine beginnende Abnahme des Induktivitätswerts zeigte, als der Überlagerungs-Gleichstrom auf 200 mA erhöht wurde.

45

50

Es wurde eine weitere planare Induktivität hergestellt, die der oben beschriebenen Induktivität mit der Ausnahme entsprach, daß die die Lücken zwischen den Windungsspulen ausfüllende Isolierschicht nicht aus Polyimid, sondern aus SiO<sub>2</sub> (aus einem organischen Silan hergestellt) war, wozu entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren eingesetzt wurde. Diese planare Induktivität zeigte elektrische Eigenschaften, die denjenigen der oben beschriebenen planaren Induktivität ähnelten.

55

#### Beispiel 25

60

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule identisch der in der Induktivität nach Beispiel 24 eingebauten Spule war, und dessen Sekundärspule letzterer identisch war mit der Ausnahme, daß anstatt 20 Windungen 10 Windungen vorhanden waren. Der Transformator ist im Aufbau identisch mit der Induktivität nach Beispiel 22, ausgenommen die Sekundärspule, wobei jede Spule zwischen zwei jeweils 2 µm dicken Polyimidschichten eingefaßt sind. Die Transformatoren wurden getestet und zeigten eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie ähnlich derjenigen, der planaren Induktivität nach Beispiel 22.

65

## Beispiel 26

Die Induktivität nach Beispiel 22 wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 500 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie vermochte einen Laststrom bis zu 400 mA bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz auszugeben. Der maximale Ausgangsstrom betrug 2 W bei einem Wirkungsgrad von 80%.

## Beispiel 27

Der planare Transformator nach Beispiel 23 wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler mit einer Eingangsspannung von 12 V und einer Ausgangsspannung von 5 V eingebaut. Weiterhin wurde die planare Induktivität nach Beispiel 22 als Ausgangs-Drosselspule in dem Vorwärts-Gleichstromwandler eingesetzt. Letzterer wurde hinsichtlich seiner Kennlinien getestet. Bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz erhielt man ein Nenn-Ausgangssignal ähnlich wie bei dem Gleichstromwandler nach Beispiel 26. Das Ergebnis lautet: Dieser Transformator dient zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler.

## Beispiel 28

Die Induktivität nach Beispiel 24 wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 500 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie vermochte einen Laststrom von bis zu 150 mA bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz auszugeben. Der maximale Ausgangsstrom betrug 0,75 W bei einem Wirkungsgrad von 70%.

## Beispiel 29

Der planare Transformator nach Beispiel 25 wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Außerdem wurde die planare Induktivität nach Beispiel 24 als Ausgangs-Drosselspule für den Vorwärts-Gleichstromwandler verwendet. Der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennlinien getestet. Sein Nenn-Ausgangssignal war ähnlich demjenigen, des abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandlers nach Beispiel 28. Da sämtliche magnetischen Elemente planar ausgebildet waren, konnte der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler ausreichend klein und leichtgewichtig ausgebildet werden.

## Beispiel 30

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt, wobei das Element dem in Fig. 49 dargestellten Typ entsprach: Zunächst wurde an eine erste, 30 µm dicken Polyimidschicht eine 100 µm dicke Kupferfolie haftend angebracht, die dann durch Naßätzen mit Eisenchlorid als Ätzmittel mit einem rechtwinkligen spiralförmigen Spulenmuster versehen wurde, welches 30 konzentrische quadratische Windungen, eine Leiterbreite von 100 µm und einen Windungsabstand von 100 µm besaß. Auf der planaren Spule wurde eine 10 µm dicke zweite Polyimidschicht gebildet. Damit war die Spule sandwichartig zwischen der ersten und der zweiten Polyimidschicht einge faßt. Diese Struktur wurde zwischen zwei quadratischen, amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis mit jeweils einer Größe von 10 mm x 10 mm ohne magnetische Beanspruchung eingefafßt, um ein planares magnetisches Element zu erhalten.

a) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden in der in Fig. 52 dargestellten speziellen Weise verschaltet, um eine planare Induktivität ähnlich derjenigen mit einer spiralförmigen Spule zu erhalten. Diese planare Induktivität wurde mit einem LCR-Messer getestet. Sie hatte einen Induktivitätswert von 20 µH bei einer Frequenz von 500 kHz, und sie besaß einen Gütekoeffizienten Q von 10.

Diese planare Induktivität wurde in einen als Hybrid-IC ausgebildeten Gleichstromwandler mit einer Schaltfrequenz von 500 kHz eingebaut und wurde als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler in Form des Hybrid-IC arbeitete gut. Folglich kann die planare Induktivität zur Miniaturisierung von Gleichstrom-Spannungsversorgungen beitragen.

Außerdem wurde die planare Induktivität in ein Filter eingebaut, um Hochfrequenzanteile aus den Gleichspannungs-Versorgungsleitungen zu beseitigen, die an die Leistungs-MOS-FETs in einem nicht linearen 10-MHz Leistungsverstärker angeschlossen waren. Dank des Einsatzes der planaren Induktivität war das Filter hinreichend klein.

b) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden nach dem in Fig. 51 dargestellten spezifischen Muster verschaltet, um eine planare Induktivität zu erhalten, die ähnlich der Induktivität mit einer mäanderförmigen Spule war. Die so hergestellte planare Induktivität wurde mit

einem LCR-Messer getestet. Es ergab sich ein Induktivitätswert von etwa 300  $\mu\text{H}$ . Außerdem ergab sich ein guter Frequenzgang, sogar bei mehreren 10 MHz.

Die planare Induktivität wurde in einem Tiefpaß-Filter eingesetzt, welches an den Ausgang eines nicht-linearen 20-MHz-Leistungsverstärkers angeschlossen war. Wegen der Verwendung der planaren Induktivität konnte das Tiefpaß-Filter wesentlich kleiner gestaltet werden als solche, die herkömmliche Hohlspulen aufweisen.

c) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden in dem in Fig. 55 dargestellten speziellen Muster verschaltet, wodurch ein planarer Transformator entstand, der eine Primärspule und eine Sekundärspule enthielt. Die Primärspule hatte 7 Windungen, die Sekundärspule hingegen hatte 2 Windungen. Das Spannungsverhältnis des Transformators betrug etwa 0,25.

d) Der so hergestellte planare Transformator wurde dazu verwendet, die Ausgangsimpedanz eines 1-MHz-Leistungsverstärkers einzustellen auf den Widerstand der an den Verstärker angeschlossenen Last. Die Ausgangsimpedanz des Leistungsverstärkers betrug 200  $\Omega$ , der Widerstandswert der Last betrug 50  $\Omega$ . Die Enden der konzentrischen Windungen jeder Spule wurden auf verschiedene Weise verschaltet, bis die Ausgangsimpedanz in der besten Weise auf den Lastwiderstand eingestellt war. Die Ausgangsimpedanz des Leistungsverstärkers kann nicht so gut auf den Lastwiderstand eingestellt werden, wenn die herkömmlichen planaren Transformatoren verwendet werden.

### Beispiel 31

Es wurden planare magnetische Elemente des in Fig. 49 dargestellten Typs und planare magnetische Elemente des in Fig. 50 dargestellten Typs nachfolgenden Verfahren hergestellt:

Zunächst wurde mittels HF-Zerstäubung auf einem Siliciumsubstrat eine 3  $\mu\text{m}$  dicke Schicht aus einer  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{60}$ -Legierung gebildet. Auf dieser Legierungsschicht wurde durch HF-Zerstäubung eine 1  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Dann wurde auf dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Schicht aus einer Al-Cu-Legierung erzeugt, auf der wiederum eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet und in bekannter Weise mit einem Muster versehen wurde. Unter Verwendung der mit einem Muster versehenen  $\text{SiO}_2$ -Schicht als Maske wurde die Schicht aus der Al-Cu-Legierung einer reaktiven Ionenätzung mittels eines Magnetrons unterzogen, wodurch die Al-Cu-Legierungsschicht unter Bildung von 10 Spulenwindungen geätzt wurde. Jede Windung hatte die gleiche Leiterbreite von 20  $\mu\text{m}$ . Die Lücke zwischen den Windungen betrug 5  $\mu\text{m}$ . Die Seiten der innersten Windungen waren 0,81 mm lang, während die Seiten der äußersten Windung 4,5 mm lang waren. Auf dieser Struktur wurde mittels Plasma-CVD eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet, um damit die Lücken zwischen den Windungen auszufüllen, und die die 10 Windungen aufweisende planare Spule abzudecken. Diese  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde einem Resistmaterial-Rückätzverfahren unterzogen, wodurch ihre Oberseite glatt und flach wurde. Dann wurde auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine 3  $\mu\text{m}$  dicke Legierungsschicht aus  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{60}$  gebildet.

a) Die Anschlüsse des planaren magnetischen Elements des in Fig. 49 gezeigten Typs wurden durch Bonddrähte mit einem Leiterraum verbunden und dann mit einem Vergußharz eingekapselt, um ein Gehäuse mit einer Reihe von Anschlußstiften (SIP-Gehäuse) zu erhalten, welches gemäß Fig. 67 20 Anschlußstifte enthielt. Dieses Bauelement wurde kombiniert mit einem Halbleiter-Relais, so daß seine Induktivität schrittweise dadurch geändert werden konnte, daß man ein externes elektronisches Bauelement betätigte. Damit konnte dieses magnetische planare Element besser als Einstellelement dienen als herkömmliche Elemente.

b) Die Anschlüsse des planaren magnetischen Elements des in Fig. 50 dargestellten Typs wurden mittels Bonddrähten mit einem Leiterraum verbunden und dann mit einem Kunstharz-Gehäuse eingekapselt, um ein DIP-Bauelement (ein Bauelement mit zwei Reihen von Anschlußstiften) zu erhalten, welches gemäß Fig. 68 40 Anschlußstifte enthielt. Das Bauelement wurde kombiniert mit einem Halbleiter-Relais, so daß sein Induktivitätswert schrittweise geändert werden konnte durch Betätigung eines externen elektronischen Bauelements. Damit konnte dieses magnetische planare Element besser als Einstellelement dienen.

c) Nach dem gleichen Verfahren wie bei dem SIP-Bauelement (a) wurde ein SIP-Bauelement des in Fig. 67 dargestellten Typs hergestellt, mit der Ausnahme, daß das Planarelement und der Leiterraum in einem Mn-Zn-Ferrit-Gehäuse eingekapselt war. Dieses SIP-Bauelement läßt sich in verschiedenen Einrichtungen einsetzen, zum Beispiel in einem aufwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler, einem abwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler, eine HF-Schaltung zur Verwendung in flachen Pagern und in einem Resonanz-Gleichstromwandler. Fig. 69 zeigt ein Beispiel für einen aufwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler. Fig. 70 zeigt ein Beispiel für einen abwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler. Fig. 71 zeigt ein Beispiel für eine HF-Schaltung. Fig. 72 zeigt ein Beispiel für einen Resonanz-Gleichstromwandler.

### Beispiel 32

Es wurde eine planare Induktivität mit einer Windung von dem in Fig. 62A dargestellten Typ hergestellt, welche ein Siliciumsubstrat, einen Aluminiumleiter und Isolierschichten aus Siliciumdioxid enthielt. Die Strukturparameter der eine Windung aufweisenden, planaren Induktivität gemäß Fig. 62B waren folgende:

$$d_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$d_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 1 \times 10^{-6} \text{ (m)} \\ \delta_2 &= 1 \times 10^{-6} \text{ (m)} \\ \mu_s &= 10^4 \\ \rho &= 2,65 \times 10^{-8} \text{ (}\Omega\text{m)} \\ d_3 &= 14 \times 10^{-6} \text{ (m)} \end{aligned}$$

Die planare Induktivität besaß folgende elektrische Kennwerte:

$$\begin{aligned} L &= 32 \text{ (nH)} \\ R_{DC} &= 14 \text{ (m}\Omega\text{)} \\ I_{max} &= 630 \text{ (mA)} \\ Q_{1 \text{ MHz}} &= 15 \\ Q_{10 \text{ MHz}} &= 150 \end{aligned}$$

Q ist der Gütekoeffizient, bei dem es sich um das Verhältnis des Induktivitätswertes L (effektiv) zu dem Gleichstromwiderstand handelt. Je größer die Gütes Q, desto besser.

Die eine Windung aufweisende planare Induktivität wurde getestet, und es wurde festgestellt, daß praktisch keine magnetischen Flüsse aus der Induktivität austreten.

Es wurde eine Vergleichsinduktivität mit der in Fig. 73 dargestellten Struktur hergestellt. Wie aus Fig. 73 ersichtlich ist, besaß die Vergleichsinduktivität die gleiche Größe wie Beispiel 32, das heißt  $d_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ ;  $d_3 = 14 \times 10^{-6} \text{ (m)}$ , jedoch enthielt die Induktivität eine spiralförmige planare Spule mit 124 Windungen, und nicht eine Einzelwindungs-Spule. Unterhalb und oberhalb des Spulenleiters 42 befinden sich zwei magnetische Schichten 30.

Die Vergleichsinduktivität besaß folgende elektrische Eigenschaften:

$$\begin{aligned} L &= 900 \text{ (}\mu\text{H)} \\ R_{DC} &= 600 \text{ (}\Omega\text{)} \\ I_{max} &= 6,40 \text{ (mA)} \\ Q_{1 \text{ MHz}} &= 9 \\ Q_{10 \text{ MHz}} &= 90 \end{aligned}$$

Offensichtlich besitzt die planare Einzelwindungs-Induktivität nach Beispiel 32 eine große Stromkapazität und eignet sich zur Verwendung in einer starken Spannungsversorgung. Obschon ihr Induktivitätswert relativ gering ist, ist ihre Impedanz bei hohen Betriebsfrequenzen groß genug.

#### Patentansprüche

1. Planares magnetisches Element umfassend:

ein Substrat (10);

eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;

eine erste Isolierschicht (20B), die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;

eine planare Spule (40), die aus einem Leiter mit mehreren Windungen besteht und über der ersten Isolierschicht angeordnet ist, sowie ein Lücken-Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist, bei dem es sich um das Verhältnis der Dicke des Leiters zu der Lücke oder dem Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen handelt;

eine zweite Isolierschicht (20C), die über der planaren Spule angeordnet ist; und

eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.

2. Element nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein aktives Element (90) oder ein passives Element, welches auf dem Substrat ausgebildet ist.

3. Element nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken zwischen den Windungen mit einem Isoliermaterial gefüllt sind.

4. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken leer bleiben.

5. Element nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine Verbindungsschicht, die zwischen dem Substrat und dem Leiter liegt.

6. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, wobei diese Einheit sandwichartig eingeschlossen ist zwischen der ersten Isolierschicht und der zweiten magnetischen Schicht.

7. Element nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine Primärspule und eine Sekundärspule über der magnetischen Primärschicht bildet.

8. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine spiralförmige Spule ist, die folgender Beziehung genügt:

$$w \geq a_0 + 2 \alpha$$

wobei w die Breite der ersten und der zweiten magnetischen Schicht,  $a_0$  die Breite der planaren Spule,  $\alpha$   $(\mu_s \times g \times t/2)^{1/2}$  mit  $\mu_s$  als der Permeabilität der magnetischen Elemente, t der Dicke der ersten und der zweiten magnetischen Schicht und g dem Abstand zwischen der ersten und der zweiten magnetischen Schicht ist.

9. Element nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule aus zwei Spulenelementen besteht und weiterhin eine dritte Isolierschicht aufw. ist, die zwischen den Spulenelementen liegt und ein Durchkontaktierungsloch sowie einen in dem Durchkontaktierungsloch befindlichen Leiter besitzt, welcher die Spulenelemente miteinander verbindet.
10. Element nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule ein Magnetfeld erzeugt, und daß die erste und die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufweisen, deren Achse sich rechtwinklig zu der Achse des Magnetfelds erstreckt. 5
11. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht jeweils vier dreieckige magnetische Elemente aufweist, die so angeordnet sind, daß ihre Scheitel einander berühren, wobei jedes dreieckige magnetische Element eine uniaxiale Anisotropie besitzt, deren Achse sich parallel zu der Grundlinie erstreckt. 10
12. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht in einer Oberfläche streifenförmige Nuten und Vorsprünge aufweisen, die sich parallel zu dem Leiter erstrecken.
13. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine rechtwinklige spiralförmige Spule ist, und mit einer Hauptachse ausgerichtet ist, mit Achsen leichter Magnetisierung der ersten und der zweiten magnetischen Schicht. 15
14. Element nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.
15. Element nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zum Abschirmen von magnetischen Flüssen, die aus der planaren Spule herausstreuen. 20
16. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule mehrere rechtwinklige spiralförmige Spulen enthält und die erste sowie die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie und Achsen leichter Magnetisierung besitzen, die mit den Hauptachsen der rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen ausgerichtet sind. 25
17. Element nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.
18. Element nach Anspruch 16, gekennzeichnet durch Mittel zum Abschirmen von magnetischen Flüssen, die aus der planaren Spule herausstreuen.
19. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Planarspule mehrere Außenanschlüsse besitzt, und aus mehreren planaren Einzelwindungsspulen besteht, die mit verschiedenen Außendurchmessern auf der ersten Isolierschicht ausgebildet sind. 30
20. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule ein Leiter-Geometrie-verhältnis von mindestens 1 besitzt, bei dem es sich um das Verhältnis der Breite des Leiters zu dessen Dicke handelt. 35
21. Planares magnetisches Element umfassend:  
ein Substrat (10);  
eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;  
eine erste Isolierschicht (20B), die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;  
eine aus einem Leiter gebildete planare Spule (40) mit mehreren Windungen, die über der ersten Isolierschicht angeordnet und ein Leiter-Geometrie-verhältnis von mindestens 1 aufweist, wobei das Leiter-Geometrie-verhältnis das Verhältnis der Leiterdicke zu der Leiterbreite ist; 40  
eine zweite Isolierschicht (20C), die über der planaren Spule angeordnet ist; und  
eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.
22. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat ein Halbleiter ist. 45
23. Element nach Anspruch 21 und 22, gekennzeichnet durch ein aktives Element (90) oder ein passives Element auf dem Substrat.
24. Element nach einem der Ansprüche 21 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken zwischen den Leitern mit Isoliermaterial gefüllt sind.
25. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken frei bleiben. 50
26. Element nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen der Planarspule ein Hohlraum gebildet ist, welcher mindestens ein Drittel der Querschnittsfläche der Lücke belegt.
27. Element nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch eine Verbindungsschicht zwischen Substrat und Leiter. 55
28. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, die sandwichartig zwischen der ersten Isolierschicht und der zweiten magnetischen Schicht eingeschlossen ist.
29. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine Primärspule und eine Sekundärspule bildet. 60
30. Planares magnetisches Element, gekennzeichnet durch:  
ein Substrat (10);  
eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;  
eine erste Isolierschicht (20B) über der ersten magnetischen Schicht;  
eine aus einem Leiter (42) gebildete planare Spule (40) mit mehreren Windungen, die über der ersten Isolierschicht angeordnet ist und ein Lücken-Geometrie-verhältnis von mindestens 1 aufweist, wobei das Lücken-Geometrie-verhältnis das Verhältnis der Dicke des Leiters zu dem Abstand zwischen benachbarten Windungen ist; 65

eine zweite Isolierschicht (20C) die über der planaren Spule angeordnet ist; und  
 eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist,  
 wobei die planare Spule ein Magnetfeld erzeugt und die erste und die zweite magnetische Schicht eine  
 uniaxiale magnetische Anisotropie besitzen, die sich rechtwinklig zur Achse des Magnetfelds erstreckt.

31. Element nach Anspruch 30, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

32. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß jede Isolierschicht aus mehreren Isolier-Teil-  
 schichten besteht und jede magnetische Schicht aus mehreren magnetischen Teilschichten besteht, die  
 zwischen den Isolier-Teilschichten liegen und derart angeordnet sind, daß jeweils zwei benachbarte Teil-  
 schichten mit ihren Achsen leichter Magnetisierung einander rechtwinklig kreuzen.

33. Element nach Anspruch 32, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

34. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht  
 jeweils vier dreieckige magnetische Elemente enthalten, die einander mit den Scheitel berühren, wobei  
 jedes dreieckige magnetische Element eine uniaxiale magnetische Anisotropie besitzt, deren Achse sich  
 parallel zu der Grundlinie erstreckt.

35. Element nach Anspruch 34, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

36. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht  
 auf einer Oberfläche streifenförmige Nuten und Vorsprünge aufweisen, die sich parallel zu den Leitern  
 erstrecken.

37. Element nach Anspruch 36, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

38. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine rechtwinklige spiralför-  
 mige Spule ist und die erste und die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie  
 aufweisen und mit ihrer Achse leichter Magnetisierung ausgerichtet sind, mit den Hauptachsen der recht-  
 winkligen spiralförmigen Spulen.

39. Element nach Anspruch 38, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat ausgebildetes aktives Element  
 (90) oder passives Element.

40. Element nach Anspruch 38, gekennzeichnet durch Mittel zum Abschirmen magnetischer Leckflüsse von  
 der planaren Spule.

41. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten  
 und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.

42. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule aus mehreren rechtwinkligen  
 spiralförmigen Spulen besteht, die mit ihren Hauptachsen zueinander ausgerichtet sind.

43. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht  
 miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, die sandwichartig zwischen der ersten Isolier-  
 schicht und der zweiten magnetischen Schicht eingeschlossen ist.

44. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule zwei rechtwinklige spiralför-  
 mige Spulen aufweist, die mit ihren Hauptachsen ausgerichtet sind, und daß die zweiten magnetischen  
 Schichten auf den rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen angeordnet sind, wobei die Achsen leichter Ma-  
 gnetisierung mit den Hauptachsen der rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen ausgerichtet sind.

45. Planares magnetisches Element, umfassend:

ein Substrat (10);

eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;

eine erste Isolierschicht (20B) die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;

eine über der ersten Isolierschicht angeordnete planare Spule (40), die mehrere Außenanschlüsse sowie  
 mehrere planare Einzelwindungsspulen aufweist, die in der selben Ebene angeordnet sind;

eine zweite Isolierschicht (20C) die über der planaren Spule angeordnet ist; und

eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.

46. Planares magnetisches Element, umfassend:

ein Substrat (10);

einen hohlen zylindrischen Leiter (40) der auf dem Substrat angeordnet ist;

einen nach Art einer Toruswicklung ausgebildetes magnetisches Element (30) das den hohlen zylindrischen  
 Leiter umgibt;

eine Isolierschicht (20), die auf dem Außenumfang des torusähnlich ausgebildeten magnetischen Elements  
 gebildet ist; und

eine leitende Schicht (40), welche die Isolierschicht, und die Enden des torusförmigen magnetischen Ele-  
 ments abdeckt und an das obere oder untere Ende des hohlen zylindrischen Leiters angeschlossen ist.

47. Element nach Anspruch 46, gekennzeichnet durch eine zweite leitende Schicht (42B), welche die Isolier-  
 schicht bedeckt, und eine zweite Isolierschicht (20B), welche die zweite leitende Schicht bedeckt.

48. Element nach Anspruch 46, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

49. Planares magnetisches Bauelement, gekennzeichnet durch

ein hohles zylindrisches magnetisches Element; und

mehrere planare magnetische Elemente des Typs nach Anspruch 46, die in radialer Richtung des hohlen  
 zylindrischen magnetischen Elements in Reihe geschaltet sind.

50. Planares magnetisches Bauelement, gekennzeichnet durch



eine hohles zylindrisches magnetisches Element; und  
mehrere planar magnetisch Elemente des Typs nach Anspruch 49, die in axialer Richtung des hohlen  
zylindrischen magnetischen Elements übereinander gelegt sind.

Hierzu 58 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

— Leerseite —

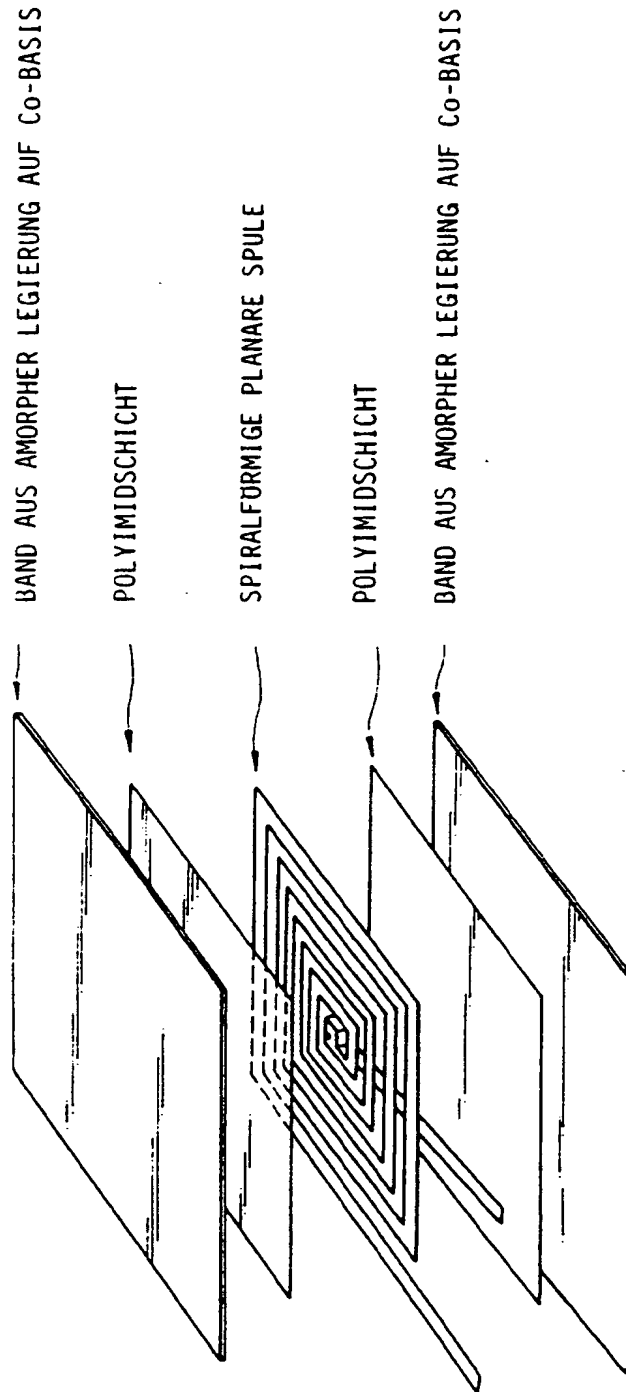


FIG. 1

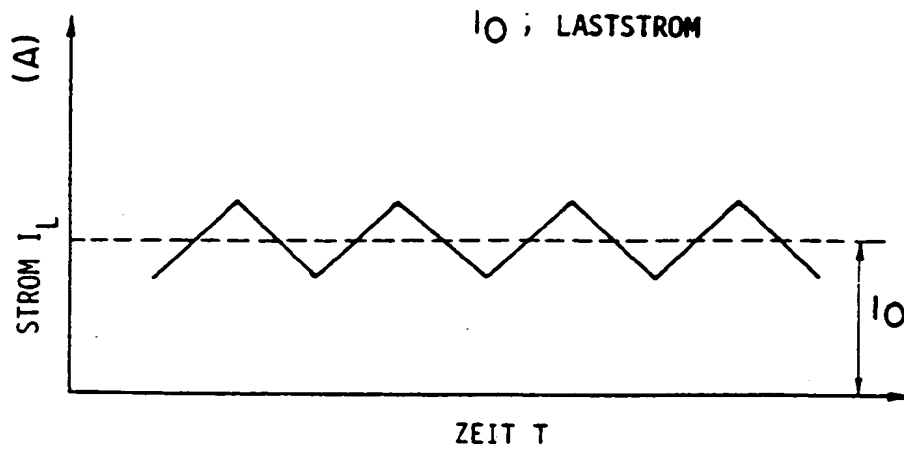


FIG. 2A

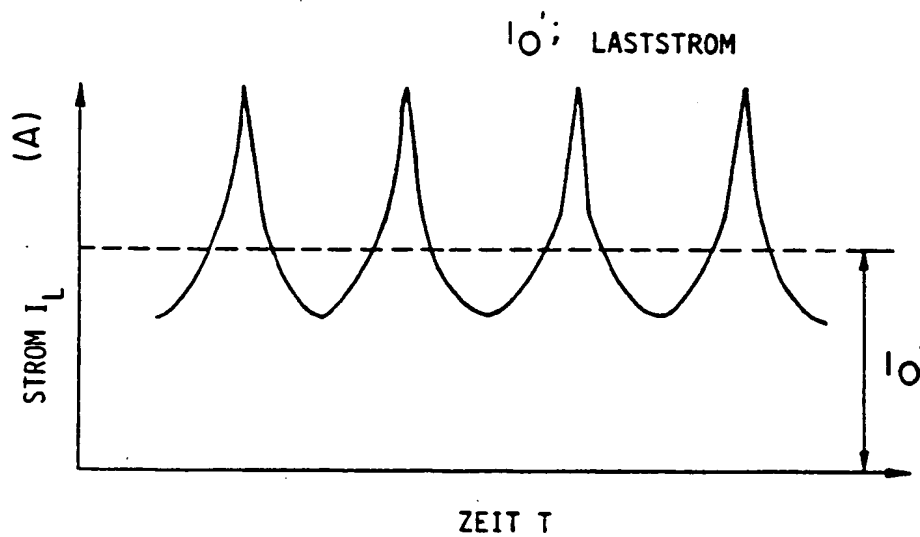


FIG. 2B

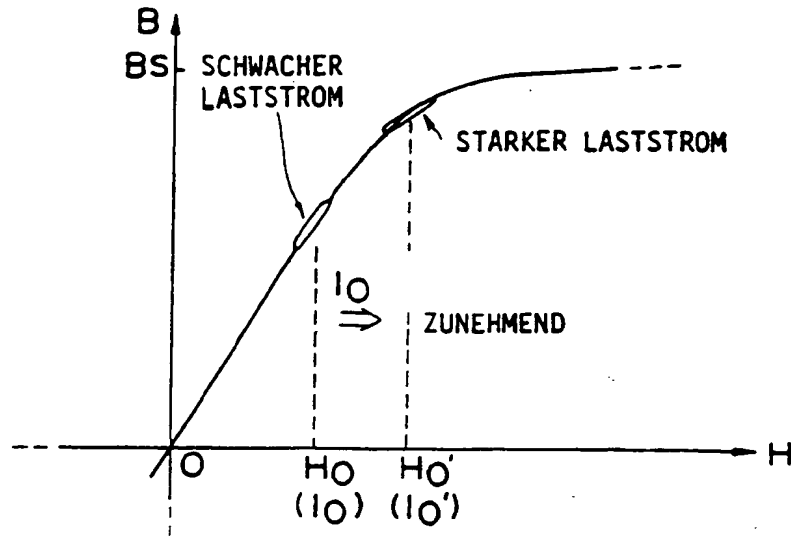


FIG. 3

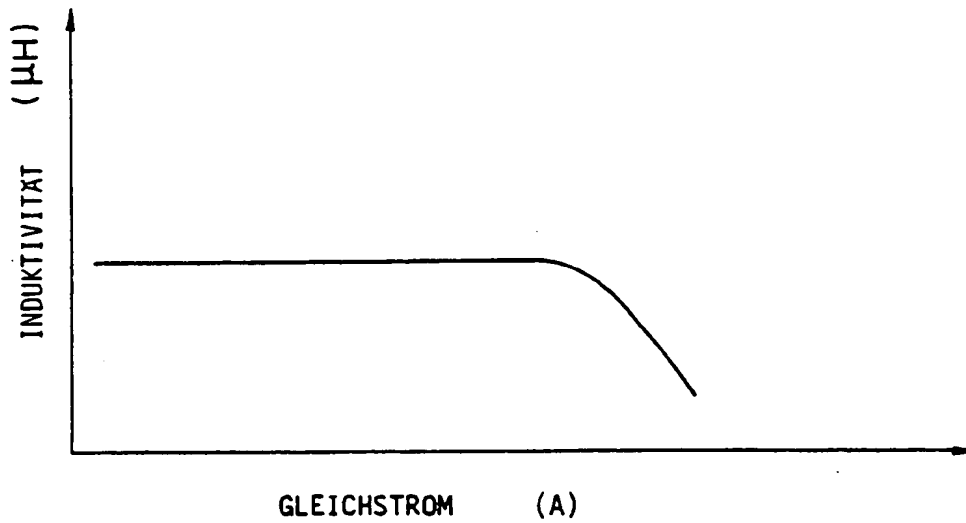


FIG. 4

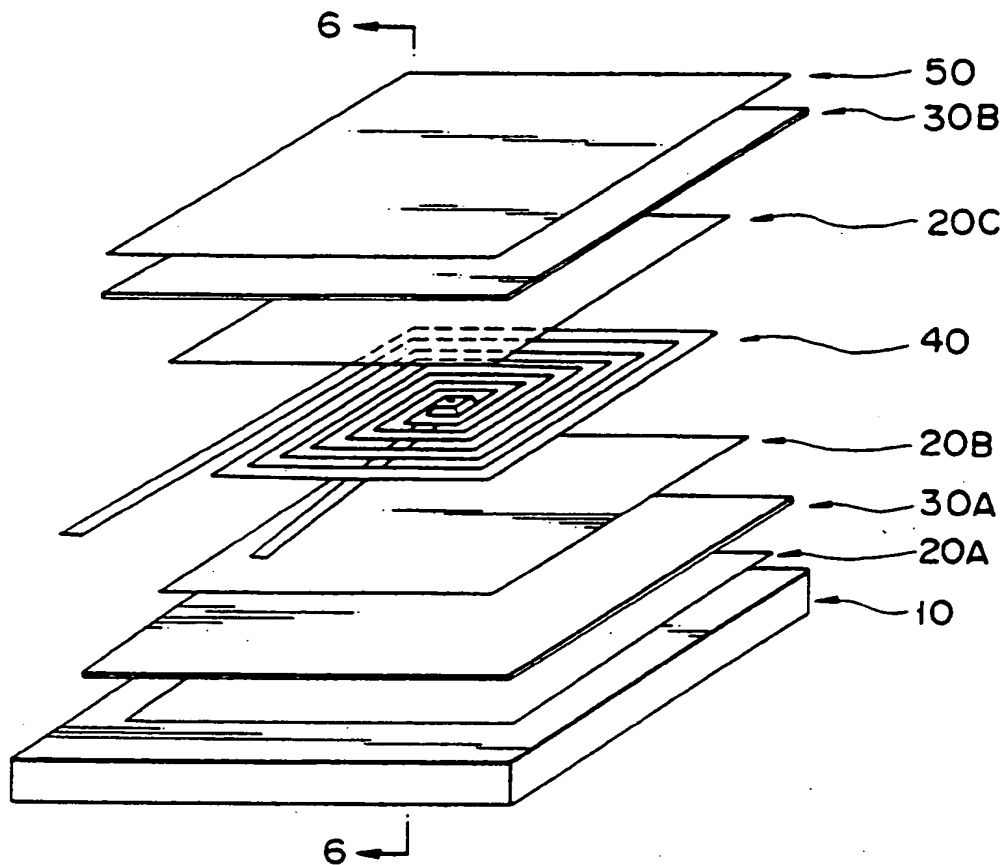


FIG. 5

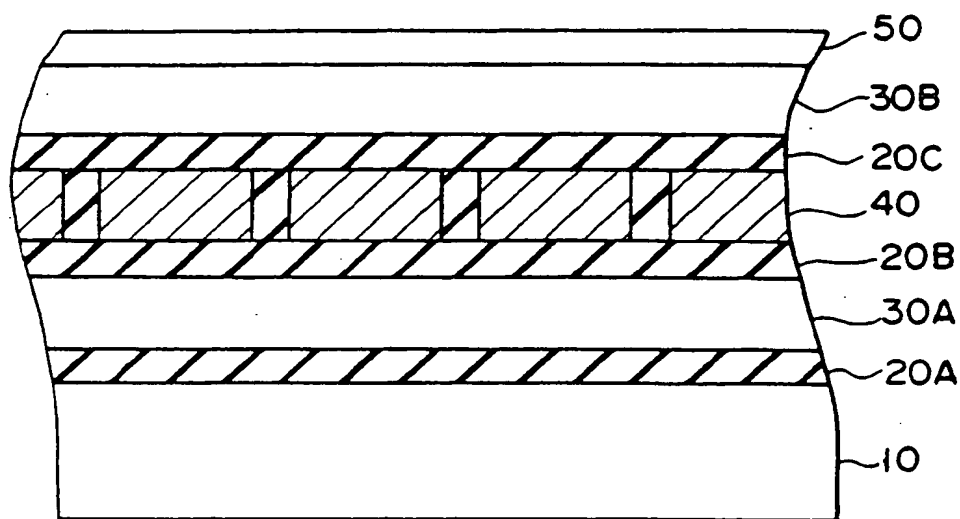


FIG. 6

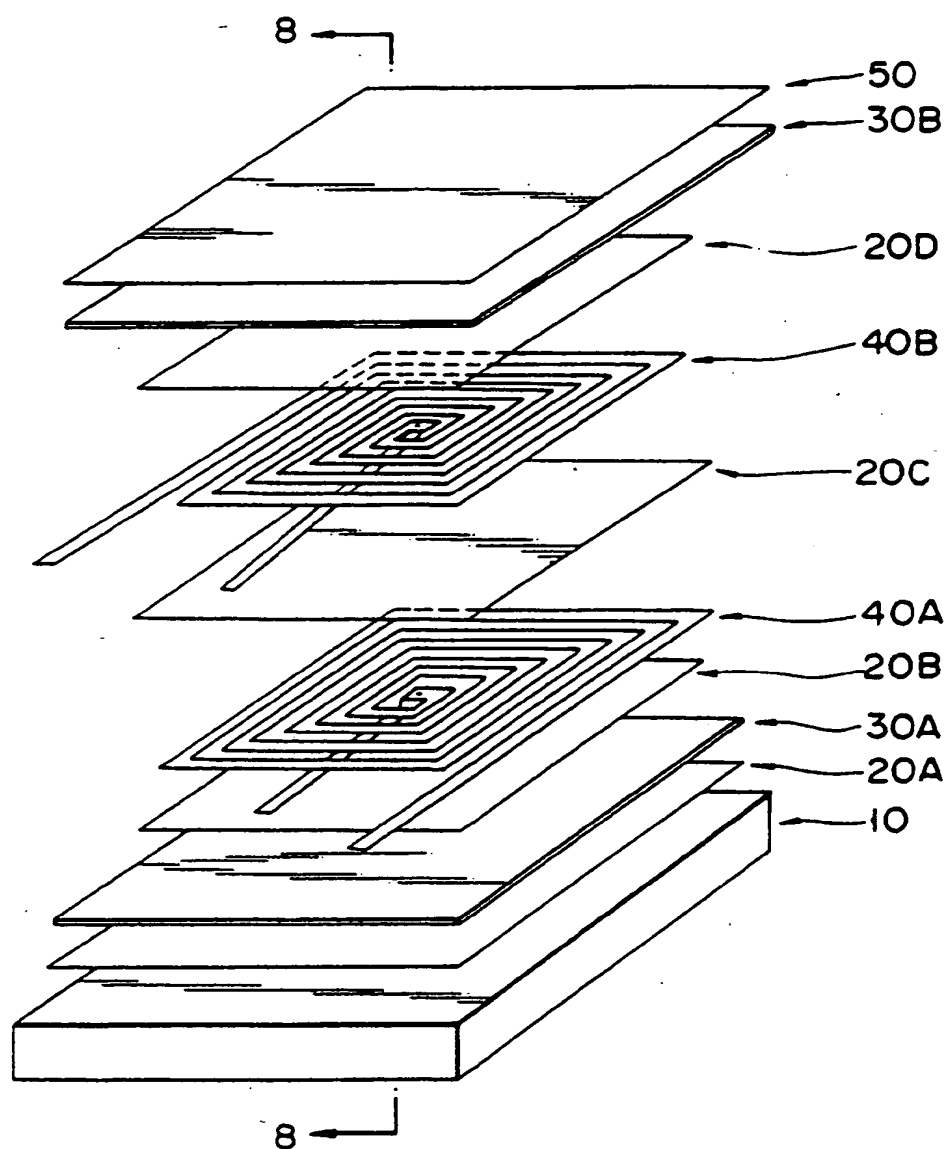


FIG. 7



Sahashi u.a. beschrieben ist in Amorphas Planar Inductor for Small Power Supplies, the National Convention Record, Institute of Electrical Engineers of Japan 1989, s. 18 — 5-3. Wie aus der grafischen Darstellung in Fig. 2A ersichtlich ist, fließen durch diese Drosselspule zwei Ströme. Der erste Strom ist ein Gleichstrom, welcher dem Laststrom entspricht. Der zweite Strom ist ein Wechselstrom, der durch den Betrieb eines Halbleiterschalters erzeugt wurde. Wenn der Gleichstrom zunimmt, verschiebt sich der Arbeitspunkt des weichmagnetischen Kerns in den Sättigungsbereich der B-H-Kurve. Im Ergebnis verringert sich die magnetische Permeabilität der magnetischen Legierung, wodurch die Induktivität abrupt abnimmt, wie in Fig. 2B gezeigt. Wie aus Fig. 3 ersichtlich, wird der Wechselstrom beim scharfen Abfall des Induktivitätswerts zu groß. Dies r übermäßige Wechselstrom stellt eine Belastung für den Halbleiterschalter dar, der in einigen Fällen möglicherweise sogar zerstört wird.

Es ist erwünscht, daß die elektrische Eigenschaft der Drosselspule, so zum Beispiel deren Induktivität, auch dann unverändert bleibt, wenn durch die Spule ein überlagerter Gleichstrom fließt. Fig. 4 ist eine grafische Darstellung, die den Verlauf eines typischen überlagerten Gleichstroms in der Spule darstellt, wobei die Beziehung zwischen dem Induktivitätswert einer Spule und einem durch diese Spule fließenden überlagerten Gleichstrom dargestellt ist.

Im Fall eines planaren Induktors ist die leitende Spule sehr nahe bei den weichmagnetischen Kernen und erzeugt mithin ein intensives Magnetfeld auch dann, wenn der durch die Spule fließende Strom ziemlich schwach ist. Damit gehen die weichmagnetischen Kerne sehr leicht in magnetische Sättigung. Es wird erläutert, wie eine solche magnetische Sättigung beispielsweise in einer planaren Induktivität eintritt, die eine spiralförmige planare Spule aus einer Al-Cu-Legierung, zwei die Spule einschließende Isolierschichten und zwei die Spule und die Isolierschichten zusammenklammernde Magnetschichten aufweist.

Die planare Spule dieser planaren Induktivität besteht aus einem Leiter mit einer Breite von 50 µm und einer Dicke von 10 µm. Die Spule besitzt 20 Windungen, wobei die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen 10 µm beträgt. Jede Isolierschicht hat eine Dicke von 10 µm, während jede Magnetischicht eine Dicke von 5 µm aufweist. Die planare Spule hat eine magnetische Sättigungsflußdichte  $B_s$  von 15 kG und eine magnetische Permeabilität  $\mu_s$  von 5000.

Wenn man annimmt, daß der Al-Cu-Leiter eine zulässige Stromdichte von  $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$  besitzt, so beträgt der zulässige Strom  $I_{\text{max}}$  250 mA. Die Anmelderin hat die planare Induktivität geprüft, um die Beziehung zwischen dem durch die Spule fließenden Strom und der Stärke des Magnetfelds, das in der Oberfläche der magnetischen Schicht aus dem Strom erzeugt wird, zu bestimmen. Die Prüfungsergebnisse zeigten, daß beide Magnetschichten magnetisch gesättigt waren, als der Strom durch die Al-Cu-Spule 48 mA und mehr betrug. Hieraus folgt, daß, wenn eine solche planare Induktivität als Drosselspule verwendet wird, der maximale überlagerte Gleichstrom auf 48 mA begrenzt ist. Dieser Wert ist nicht mehr als etwa ein Fünftel des zulässigen Spulenstroms  $I_{\text{max}}$ . Die Magnetschichten gehen unvermeidlich leicht in die magnetische Sättigung.

Der begrenzte überlagerte Gleichstrom ist ein Nachteil, der nicht nur in der als Drosselspule verwendeten planaren Induktivität gravierend ist, sondern auch in einem planaren Transformator. In einem planaren Transformator, der zum Beispiel in einem DC-DC-Umrichter für die Spannungsübersetzung oder die Zeilenablenkung eingesetzt ist, wird eine impulsförmige Spannung einer Polarität an die Primärspule gelegt. Die magnetischen Schichten werden dadurch magnetisch gesättigt, wodurch die Induktivität des Transformators abrupt abnimmt.

Folglich wurden Versuche unternommen, eine planare Induktivitätsspule und einen planaren Transformator zu schaffen, die derart ausgebildet sind, daß der Einfluß der Sättigung der magnetischen Schichten reduziert ist, um auf diese Weise den maximalen überlagerten Gleichstrom des Bauelements, welches die planare Induktivität oder den planaren Transformator enthält, zu erhöhen und wirksamen Nutzen aus der magnetischen Anisotropie der Magnetschichten zu ziehen.

Planare Spulen lassen sich in verschiedene Typen unterteilen, so zum Beispiel gibt es den Zick-Zack-Typ, den Spiraltyp, den Zick-Zack/Spiraltyp und dergleichen, abhängig von dem jeweiligen Muster der Spule. Von diesen Typen kann der Spiraltyp den größten Induktivitätswert besitzen. Folglich läßt sich eine spiralförmige Planarspule kleiner ausbilden als jeder andere Spulentyp mit dem gleichen Induktivitätswert. Um die Anschlüsse der spiralförmigen Planarspule zu bilden, ist es allerdings notwendig, zwei in verschiedenen Ebenen befindliche Spiralspulen mit Hilfe einer Durchkontaktierung zu verbinden, oder Leiter zu verwenden, mit denen die Anschlüsse nach außen geführt sind. Der Herstellungsprozeß einer spiralförmigen Planarspule ist allerdings komplexer als die Herstellung anderer Typen von Planarspulen.

Für die Gestalter elektronischer Schaltungen ist es wünschenswert, daß planare magnetische Elemente in eine Schaltung eingebaut werden, die eine sogenannte "Trimm-Funktion" besitzen, das heißt die Möglichkeit bieten, daß die Eigenschaften und Kennwerte der Elemente auf für die Schaltung geeignete Werte einstellbar sind. In der Tat wurde bereits auch ein magnetisches Element mit einer solchen "Trimm-Funktion" entwickelt. Dieses Bauelement besitzt eine Schraube, die durch Drehen ihre Lage bezüglich des Kerns der Spule verändert, um auf diese Weise den Induktivitätswert des magnetischen Elements kontinuierlich zu ändern. Allerdings haben die meisten herkömmlichen planaren magnetischen Elemente keine "Trimm-Funktion", und zwar aus folgendem Grund:

Wie bekannt, hängen die Kennwerte von planaren magnetischen Elementen in starkem Maß von den strukturellen Parametern und den Kennwerten der planaren Spulen und magnetischen Schichten ab. Diese die Kennwerte der magnetischen Elemente bestimmenden Faktoren hängen ab von den Herstellungsschritten der Elemente. Da diese Schritte kaum unter identischen Bedingungen durchgeführt werden können, schwanken die Eigenschaften der sich ergebenden Bauelemente stark. Naturgemäß ist es wünschenswert, daß die Elemente mit der "Trimm-Funktion" ausgestattet sind. Allerdings können sie die "Trimm-Funktion" aufgrund ihrer speziellen strukturellen Beschränktheit nicht aufweisen.

Ein Transformator mit hoher Ausgangsleistung ist offenbart in A.F. Goldberg u. a., Issues Related to 1 — 10 MHz Transformer Design, IEEE Transactions Power Electronics, Band 4, Nr. 1. Januar 1989, Seiten

113 - 123.

Wie oben ausgeführt ist, wurden bislang keine planaren magnetischen Elemente produziert, die klein genug sind, um mit anderen Schaltungselementen integriert werden zu können, so daß es nicht möglich ist, in der Praxis ausreichend kleine integrierte LC-Schaltungsabschnitte herzustellen, wobei der Stromversorgungsteil ein Beispiel ist.

Da die mehrschichtigen planaren Induktivitäten im wesentlichen einen offenen Magnetkreis besitzen, ist es schwierig, folgenden beiden Erfordernissen zu genügen:

- 1) Sie besitzen keine Leckflüsse und beeinflussen nur geringfügig die anderen Bauteile der integrierten Schaltung (IC), in die sie eingebaut sind.
- 2) Sie haben einen hohen Induktivitätswert.

Deshalb können mehrschichtige planare Induktivitäten nicht zur Schaffung ausreichend kleiner, integrierter LC-Schaltungsabschnitte, zum Beispiel eines Stromversorgungsteils, dienen.

Dementsprechend besteht noch ein starker Bedarf an planaren magnetischen Elementen zur Verwendung in einem Schaltungsabschnitt, welche die übrigen Komponenten der Schaltung wenig beeinflussen. Die herkömmlichen planaren magnetischen Elemente besitzen praktisch keine "Trimm-Funktion" aufgrund der ihnen eigenen strukturellen Beschränkungen.

Hauptaufgabe der Erfindung ist es, ein planares magnetisches Element zu schaffen, welches klein genug ist, um mit elektrischen Elementen anderer Typen zusammen integriert zu werden.

Außerdem soll die Erfindung ein planares magnetisches Element schaffen, welches eine ausreichend große Induktivität besitzt.

Ferner zielt die Erfindung ab auf die Schaffung eines planaren magnetischen Elements, das nur geringe Leckflüsse aufweist.

Ziel ist außerdem ein planares magnetisches Element, welches sich durch eine gute Hochfrequenz-Kennlinie und Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie auszeichnet;

ferner ein planares magnetisches Element mit hoher Stromaufnahmefähigkeit und mithin hohem Induktivitätswert;

ferner ein planares magnetisches Element, bei dem die Anschlüsse leicht nach außen zu leiten sind;

schließlich ein planares magnetisches Element mit Trimm-Funktion, so daß seine elektrischen Kennwerte von außen eingestellt werden können.

Die obigen Aufgaben und Ziele der Erfindung werden durch die nachstehend erläuterten sechs Aspekte der vorliegenden Erfindung gelöst beziehungsweise erreicht. Erfindungsgemäß haben die unterschiedlichen Aspekten entsprechenden Bauelemente jeweils bessere Kennwerte als die herkömmlichen Bauelemente, lassen sich in praktisch jeder möglichen Kombination einsetzen und können dadurch neue Typen planarer Elemente schaffen, die noch bessere Eigenschaften aufweisen und noch besser arbeiten.

Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches aufweist: eine spiralförmige, planare Spule mit einem Lücken-Geometrieverhältnis (das heißt einem Verhältnis der Breite des Leiters bezüglich der Lücke zwischen den Leitern) von mindestens 1; Isolierteile, die mit der spiralförmigen planaren Spule laminiert sind; und magnetische Teile, die mit den Isolierteilen laminiert sind. Die Spule dieses planaren magnetischen Elements besitzt einen relativ niedrigen Widerstand. Deshalb besitzt die Spule einen hohen Gütekoeffizienten  $Q$ , wenn sie als Induktionsspule verwendet wird, und sie besitzt bei Verwendung als Transformator eine hohe Verstärkung. Mit anderen Worten: das Element besitzt ausreichende Fähigkeiten.

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine planare Spule aufweist, die aus einem Leiter gebildet ist, der ein Leiter-Geometrieverhältnis (das heißt ein Verhältnis der Breite des Leiters zu dessen Dicke) von mindestens 1 aufweist. Hierzu sollte beachtet werden, daß, wenn dieses Element als Induktivität eingesetzt wird, seine Fähigkeit durch den zulässigen Strom und den Induktivitätswert bestimmt wird. Der zulässige Strom wiederum bestimmt sich durch die Querschnittsfläche des Leiters. Damit läßt sich der zulässige Strom dadurch erhöhen, daß man den Leiter breiter macht. Wenn der Leiter breiter gemacht wird, ist es jedoch unvermeidbar, eine größere Fläche in der Ebene zu belegen, was dem Erfordernis zuwiderläuft, das planare magnetische Element zu miniaturisieren. Andererseits läßt sich die Induktivität des planaren magnetischen Elements in der Tat dadurch erhöhen, daß man den Leiter mehrere Male umbiegt und so eine Spule mit mehreren Windungen bildet. Je mehr Windungen, desto größer die Fläche, die von der Spule belegt wird. Dies läuft ebenfalls dem Erfordernis der Miniaturisierung zuwider. Das erfindungsgemäße planare magnetische Element kann einen ausreichend starken zulässigen Strom aufweisen, da der Leiter ein Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist.

Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird eine mehrschichtige planare Induktivität geschaffen, die eine spiralförmige planare Spule und diese planare Spule sandwichartig einschließende magnetische Elemente aufweist. Die magnetischen Elemente besitzen eine Breite  $w$ , die um einen Wert von mehr als  $2\alpha$  größer ist als die Breite  $a_0$  der spiralförmigen planaren Spule. Es sei angemerkt, daß der Wert  $\alpha$  gleich  $(\mu_s g t/2)^{1/2}$  beträgt, wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der magnetischen Elemente ist,  $t$  die Dicke der magnetischen Elemente ist, und  $g$  der Abstand zwischen den magnetischen Elementen ist. Da  $w > a_0 + 2\alpha$ , besitzt diese planare Induktivität einen großen Induktivitätswert. Wenn  $b$  beispielsweise  $w = a_0 + 2\alpha$ , so ist die Induktivität mindestens um das 1,8-fache größer als im Fall  $w = a_0$ . Die planare Induktivität hat nicht nur einen großen Induktivitätswert, sondern außerdem einen kleinen Leckfluß. Diesbezüglich eignet sich die planare Induktivität als Element zur Verwendung in einer integrierten Schaltung, um die elektronischen Bauelemente dünner zu gestalten.

Gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine

planare Spule und die Spule sandwichartig einschließende magnetische Schichten aufweist. Die magnetischen Schichten sind in einer einzelnen Achse, die sich in rechtem Winkel bezüglich der Richtung des von der Spule erzeugten Magnetfelds erstreckt, magnetisch anisotrop. Aufgrund der uniaxialen magnetischen Anisotropie der magnetischen Schichten weist das planare magnetische Element eine hervorragende Kennlinie bei Überlagerung eines Gleichstroms und im Hochfrequenzbereich auf. Das Element eignet sich zur Verwendung in Hochfrequenz-Schaltkreisen, zum Beispiel in Gleichspannungswandlern. Außerdem kann das Element klein gebaut und mit anderen elektrischen Elementen anderer Typen integriert werden, um eine integrierte Schaltung zu bilden.

Gemäß einem fünften Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element mit einer planaren Spule und sandwichartig die Spule einschließenden magnetischen Schichten geschaffen. Die planare Spule besteht aus mehreren, jeweils eine Windung aufweisenden planaren Spulen, die in derselben Ebene angeordnet sind und verschiedene Größen haben, wobei jede Spule einen Außenanschluß besitzt. Dieses planare magnetische Element kann einfach an eine externe Schaltung elektrisch angeschlossen werden und läßt sich durch externe Mittel trimmen, um die elektrischen Kennwerte einzustellen. Damit eignet sich das Element sehr gut zur Verwendung in einem Gleichstromwandler vom Zerkhackertyp mit Aufwärtstransformierung, in Resonanz-Gleichstromwandlern und in sehr dünnen HF-Schaltungen zur Verwendung in Pagem.

Gemäß einem sechsten Aspekt der Erfindung wird ein planares magnetisches Element geschaffen, welches eine leitende Schicht und eine magnetische Schicht enthält. Die magnetische Schicht umgibt die leitende Schicht und bildet so einen geschlossenen magnetischen Kreis. Der in die Leiterschicht fließende Strom magnetisiert die magnetische Schicht in der Richtung des geschlossenen magnetischen Kreises. Dieses planare magnetische Element besitzt einen geringen Leckfluß und hohe Stromaufnahmefähigkeit. Es kann deshalb dazu dienen, elektronische Geräte dünner zu gestalten, wenn es in derartigen Geräten eingesetzt wird.

Die oben beschriebenen erfindungsgemäßen planaren magnetischen Elemente können nicht nur sehr klein ausgebildet sein, sondern können auch verbesserte Eigenschaften besitzen, wie sie allgemein für magnetische Elemente wie Induktionsspulen gefordert werden.

Die planaren Induktivitäten und Transformatoren gemäß der Erfindung, die planare Mikro-Spulen aufweisen, sind klein und können auf einem Halbleitersubstrat ausgebildet werden. Sie lassen sich deshalb mit aktiven Elementen (zum Beispiel Transistoren) und mit passiven Elementen (zum Beispiel Widerständen und Kondensatoren) integrieren, um mit diesen Elementen ein aus einem Chip bestehendes Halbleiterbauelement zu bilden. In anderen Worten: sie dienen zur Schaffung von kleinemessenen elektronischen Bauelementen, die Induktivitäten und Transformatoren enthalten. Zusätzlich lassen sich die planaren Induktivitäten und Transformatoren gemäß der Erfindung mit Hilfe existierender Mikro-Technik herstellen, wie sie allgemein bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen zum Einsatz gelangt.

Wie aus der obigen Erläuterung ersichtlich ist, schafft die Erfindung kleine und dünne LC-Schaltungsabschnitte zum Einsatz in verschiedenen elektronischen Bauelementen und trägt schließlich zur Miniaturisierung elektronischer Bauelemente bei.

Im folgenden werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine auseinandergezogene Darstellung einer herkömmlichen planaren Induktivität mit amorphen magnetischen Bändern und quadratischen, spiralförmigen Planar-Spulen;

Fig. 2A und 2B die Strom-Wellenformen des durch die Ausgangs-Drosselspulen herkömmlicher Gleichstromwandler fließenden Stroms;

Fig. 3 eine grafische Darstellung der B-H-Kurve des in Fig. 1 dargestellten weichmagnetischen Kerns;

Fig. 4 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 1 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 5 bis 11 Diagramme und grafische Darstellungen, die zum Erläutern des ersten Aspekts der Erfindung dienen;

Fig. 5 eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung;

Fig. 6 eine Schnittansicht, die schematisch die planare Induktivität gemäß Fig. 5 darstellt;

Fig. 7 eine Draufsicht auf einen planaren Transformator gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung;

Fig. 8 eine Schnittansicht, die den planaren Transformator gemäß Fig. 7 zeigt;

Fig. 9 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis der Induktivität gemäß Fig. 5 und deren Spulenwiderstand und deren Induktivitätswert;

Fig. 10 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis der Induktivität nach Fig. 5 bezüglich deren L/R-Wert;

Fig. 11 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrieverhältnis des Transformators gemäß Fig. 7 und dessen Verstärkung;

Fig. 12A bis 22 Diagramme und Grafiken zum Veranschaulichen und Erläutern des zweiten Aspekts der Erfindung;

Fig. 12A eine auseinandergezogene Darstellung eines magnetischen Elements gemäß dem ersten und dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches nicht nur ein hohes Leiter-Geometrieverhältnis, sondern auch ein hohes Lücken-Geometrieverhältnis aufweist;

Fig. 12B eine Schnittansicht entlang der Linie 12B-12B in Fig. 12A;

Fig. 13A bis 13D und Fig. 14 Diagramme, die zeigen, wie unter den Windungen des Spulenleiters in dem in Fig. 12A und 12B gezeigten magnetischen Element Hohlräume ausgebildet werden;

Fig. 15 eine perspektivische Darstellung eines planaren Kondensators gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, der als Kondensator mit parallelen Elektroden ausgebildet ist;

Fig. 16 eine grafische Darstellung der Abhängigkeit des Wertes  $C/C_0$  des in Fig. 15 dargestellten planaren Kondensators von dem Wert  $k$ ;

Fig. 17 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches eine einzeln planar Spule enthält;

Fig. 18 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, welches mehrere planare, zusammenlaminierte Spulen aufweist;

Fig. 19A und 19B Draufsichten auf zwei modifizierte Ausführungsformen der in dem magnetischen Element gemäß Fig. 17 und 18 verwendeten planaren Spulen;

Fig. 20 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, umfassend eine planare Spule, ein Substrat und eine Bindeschicht zwischen der Spule und dem Substrat;

Fig. 21 eine Schnittansicht eines Mikro-Transformators gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung;

Fig. 22 ein Diagramm, welches zwei Typen von planaren Spulen gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung aufweist;

Fig. 23 bis 28 Diagramme und grafische Darstellungen, die den dritten Aspekt der Erfindung darstellen und erläutern;

Fig. 23 und 24 auseinandergezogene Darstellungen zweier Typen von Induktivitäten gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung;

Fig. 25A bis 25C Schnittansichten der in Fig. 23 dargestellten Induktivität, um zu veranschaulichen, wie aus der Induktivität magnetische Flüsse lecken;

Fig. 26 ein Diagramm zum Veranschaulichen der Verteilung des Magnetfeldes an den Enden der planaren Spiralspule in der in Fig. 23 gezeigten Induktivität;

Fig. 27 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen der Breite  $w$  der Magnetglieder in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Lecken der Magnetflüsse;

Fig. 28 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen der Breite  $w$  der Magnetglieder in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Induktivitätswert der Induktivität;

Fig. 29 bis 48 Diagramme und grafische Darstellungen zum Erläutern des vierten Aspekts der Erfindung;

Fig. 29 eine auseinandergezogene Darstellung einer ersten planaren Induktivität, die gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung eine uniaxiale magnetische Anisotropie besitzt;

Fig. 30 ein Diagramm zum Veranschaulichen der Beziehung zwischen der Richtung des Magnetfelds, das von der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten Spule erzeugt wird, und der Achse der leichten Magnetisierung der magnetischen Kerne;

Fig. 31 eine grafische Darstellung der Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung der Induktivität (Fig. 29) und einer Magnetisierungskurve in der Achse der harten Magnetisierung der Magnetkerne;

Fig. 32A ein Diagramm der Verteilung der Magnetflüsse in solchen Bereichen der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten magnetischen Elemente, in denen sich das Magnetfeld parallel zu der Achse leichter Magnetisierung erstreckt;

Fig. 32B ein Diagramm der Verteilung der Magnetflüsse in solchen Bereichen der in der Induktivität (Fig. 29) verwendeten magnetischen Elemente, in denen sich das Magnetfeld in rechten Winkeln zu der Achse der leichten Magnetisierung erstreckt;

Fig. 33 eine auseinandergezogene Darstellung einer zweiten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 34 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 35 eine auseinandergezogene Darstellung einer modifizierten Form der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 36 eine auseinandergezogene Darstellung, die eine dritte planare Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung veranschaulicht;

Fig. 37 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 36 gezeigten planaren Induktivität;

Fig. 38 eine auseinandergezogene Darstellung einer vierten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 39 eine perspektivische Ansicht der Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht, die in die Induktivität gemäß Fig. 38 eingebaut ist;

Fig. 40 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Parametern der Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht der Induktivität (Fig. 38) und des zweiten Terms der  $U_k$  definierenden Formel;

Fig. 41 eine grafische Darstellung der Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 38 gezeigten planaren Induktivität;

Fig. 42A eine grafische Darstellung einer Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung der Induktivität (Fig. 38) und einer Magnetisierungskurve in der Achse harter Magnetisierung des magnetischen Materials,

Fig. 42B eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz in der Achse leichter Magnetisierung, und auch der Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz in der Achse harter Magnetisierung,

Fig. 43A und 43B in Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer fünften planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 44 eine Draufsicht einer modifizierten Form der in den Fig. 34A und 43B dargestellten planaren Induktivität;

Fig. 45 eine Draufsicht auf eine sechste planare Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

Fig. 46A und 46B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht eines weiteren Typs einer planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;

- Fig. 47A und 47B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer siebten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;
- Fig. 48A und 48B eine Draufsicht beziehungsweise eine Schnittansicht einer achten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung;
- Fig. 49 bis 61 Diagramme und grafische Darstellungen zum Erläutern des fünften Aspekts der Erfindung;
- Fig. 49 eine Draufsicht auf ein erstes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung;
- Fig. 50 eine Draufsicht auf ein zweites magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung;
- Fig. 51 eine Draufsicht auf ein drittes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, welches eine modifizierte Form des Elements nach Fig. 49 darstellt, in dem die Außenanschlüsse in besonderer Weise angeschlossen sind;
- Fig. 52 eine Draufsicht auf ein drittes magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, welches eine modifizierte Form des Elements nach Fig. 49 insofern ist, als die Außenanschlüsse in einer anderen Weise verbunden sind;
- Fig. 53 eine Draufsicht eines dritten magnetischen Elements gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, bei dem es sich um eine Modifizierung des Elements nach Fig. 49 insofern handelt, als die Außenanschlüsse in noch anderer Weise verbunden sind;
- Fig. 54 ein Diagramm, welches die Beziehung zwischen dem Induktivitätswert des in Fig. 49 gezeigten magnetischen Elements und der Art und Weise der Verbindung der Außenanschlüsse darstellt;
- Fig. 55 eine Draufsicht auf einen planaren Transformator, der durch Verbinden der Außenanschlüsse des magnetischen Elements nach Fig. 49 in besonderer Weise hergestellt ist;
- Fig. 56 eine Draufsicht, die einen planaren Transformator darstellt, der durch Verbinden der Außenanschlüsse des magnetischen Elements nach Fig. 49 in noch anderer Weise hergestellt ist;
- Fig. 57 eine Draufsicht auf einen weiteren planaren Transformator, hergestellt durch Verbinden der Außenanschlüsse des Elements nach Fig. 49 in noch anderer Weise;
- Fig. 58 eine grafische Darstellung der Beziehung zwischen den Spannungs- und Stromverhältnissen des magnetischen Elements nach Fig. 49 einerseits und der Art und Weise der Verbindung der Außenanschlüsse andererseits;
- Fig. 59 eine Schnittansicht eines Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, einem auf dem Substrat gebildeten aktiven Element und einem gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung ausgebildeten magnetischen Element auf dem Halbleitersubstrat;
- Fig. 60 eine Schnittansicht eines weiteren Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, einem in dem Substrat ausgebildeten aktiven Element, und magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, die oberhalb des aktiven Elements gelegen sind;
- Fig. 61 eine Schnittansicht eines Bauelements mit einem Halbleitersubstrat, magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung, die in dem Substrat ausgebildet sind, und einem oberhalb der magnetischen Elemente befindlichen magnetischen Element;
- Fig. 62A bis 64 Diagramme und grafische Darstellung zum Veranschaulichen des sechsten Aspekts der Erfindung;
- Fig. 62A eine Schnittansicht einer eine Windung aufweisenden Spule gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung;
- Fig. 62B eine teilweise geschnittene, perspektivische Ansicht der mit einer Windung ausgebildeten Spule nach Fig. 62A;
- Fig. 63A eine Schnittansicht der Spule mit einer Windung gemäß Fig. 62A, in Serie zu einer Spuleneinheit verschaltet;
- Fig. 63B eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung umfassend eine Kombination aus zwei Spuleneinheiten des in Fig. 63A dargestellten Typs;
- Fig. 64 eine Schnittansicht eines magnetischen Elements gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung, umfassend eine eine Windung aufweisende Spule des Typs nach Fig. 62A, magnetische Schichten und Isolierschichten;
- Fig. 65 ein Diagramm zum Veranschaulichen des Kriteriums zur Auswahl eines Materials für die magnetischen Schichten, wobei die Beziehung dargestellt ist zwischen der Anzahl von Windungen einer spiralförmigen planaren Spule einerseits und dem maximalen Spulenstrom  $I_{\max}$  und der Stärke (H) des durch Einspeisen des Stroms  $I_{\max}$  in die spiralförmige Spule erzeugten Magnetfelds, andererseits;
- Fig. 66 bis 72 Diagramme die verschiedene Bauelemente darstellen, in die die magnetischen Elemente gemäß der Erfindung eingebaut sind;
- Fig. 66 ein Diagramm, welches schematisch einen Pager zeigt, der ein magnetisches Element gemäß der Erfindung enthält;
- Fig. 67 eine Draufsicht auf ein 20-Pin-IC-Chip vom SIP-Typ (ein Gehäuse mit einer Reihe von Anschlußstiften), welches magnetische Elemente gemäß der Erfindung enthält;
- Fig. 68 eine perspektivische Ansicht eines 40-Pin-IC-Chips vom DIP-Typ (Gehäuse mit zwei Reihen von Anschlußstiften);
- Fig. 69 einen Schaltplan eines Gleichstromwandlers vom Aufwärtstransformierungs-Zerhacker-Typ;
- Fig. 70 einen Schaltplan eines Gleichstromwandlers vom Abwärtstransformierungs-Zerhacker-Typ;
- Fig. 71 eine Schaltungsskizze einer HF-Schaltung, wie sie für ein sehr kleines, mobiles Telefon verwendet wird;
- Fig. 72 einen Schaltplan eines Resonanz-Gleichstromwandlers; und
- Fig. 73 eine Schnittansicht einer planaren Spule für eine Ausführungsform.
- Die im folgenden erläuterten Aspekte und Ausführungsbeispiele der Erfindung können miteinander kombiniert werden, so daß eine Vielfalt magnetischer Elemente entsteht, die erfindungsgemäß ausgebildet sind. Da die

Materialen der magnetischen Elemente für die verschiedenen Aspekte der Erfindung im wesentlichen gemeinsam sind, sollen sie am Schluß der Beschreibung erläutert werden.

Der erste Aspekt der Erfindung soll unter Bezugnahme auf die Fig. 5 bis 11 erläutert werden.

Fig. 5 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung. Wie in Fig. 5 gezeigt ist, enthält die planare Induktivität ein Halbleitersubstrat 10, drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, eine spiralförmige planare Spule 40 und eine Schutzschicht 50. Die Isolierschicht 20A ist auf dem Substrat 10 gebildet. Die magnetische Schicht 30A ist auf der Schicht 20A gebildet. Die Isolierschicht 20B ist auf der magnetischen Schicht 30A gebildet. Die Spule 40 ist auf der Schicht 20B montiert. Die Isolierschicht 20C deckt die Spule 40 ab. Die magnetische Schicht 30B ist auf der Schicht 20C gebildet. Die Schutzschicht 50 ist auf der magnetischen Schicht 30B gebildet. Fig. 6 ist eine Schnittansicht entlang der Linie 6-6 in Fig. 5 und zeigt einen Teil der planaren Induktivität. In Fig. 6 sind gleiche Komponenten wie in Fig. 5 mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Fig. 7 ist eine auseinandergezogene Darstellung eines planaren Transformators gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung. Dieser Transformator ist dadurch gekennzeichnet, daß die Primär- und die Sekundärspule die gleiche Windungszahl aufweisen. Wie aus Fig. 7 hervorgeht, enthält der Transformator ein Halbleitersubstrat 10, vier Isolierschichten 20A bis 20D, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, zwei spiralförmige planare Spulen 40A und 40B, und eine Schutzschicht 50. Die Schichten 20A, 30A und 20B sind übereinander auf dem Substrat 10 ausgebildet. Die Primärspule 40A ist auf der Isolierschicht 20B gebildet. Die Isolierschicht 20C liegt auf der Primärspule 40A. Die Sekundärspule 40B ist auf der Isolierschicht 20C gebildet. Die Isolierschicht 20D liegt auf der Sekundärspule 40B. Die magnetische Schicht 30B ist auf der Schutzschicht 20D gebildet. Die Schutzschicht 50 ist auf der magnetischen Schicht 30B gebildet. Fig. 8 ist eine Schnittansicht entlang der Linie 8-8 in Fig. 7 und zeigt einen Teil des planaren Transformators. In Fig. 8 sind gleiche Teile wie in Fig. 7 mit entsprechenden Bezugszeichen versehen.

Sowohl in der planaren Induktivität gemäß Fig. 5 und 6, als auch in dem planaren Transformator gemäß Fig. 7 und 8 besteht das Substrat 10 aus Silicium. Das Siliciumsubstrat 10 kann durch ein Glassubstrat ersetzt werden. Wird ein Glassubstrat anstelle des Siliciumsubstrats 10 verwendet, so kann die unterhalb der magnetischen Schicht 30A befindliche Isolierschicht 20A weggelassen werden.

Die spiralförmige planare Spule 40 in der Induktivität gemäß Fig. 5 und die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B in dem Transformator nach Fig. 7 besitzen ein Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  von mindestens 1, wobei  $h$  die Dicke des Spulenleiters und  $b$  die Lücke oder der Abstand zwischen zwei benachbarten Windungen ist. Zur Bildung einer spiralförmigen planaren Spule mit einem solchen Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  kommen zwei alternative Verfahren in Betracht. Nach dem ersten Verfahren erfolgt ein tiefes Ätzen einer leitenden Schicht, um auf diese Weise einen spiralförmigen Schlitz in der Platte zu bilden, woraufhin der spiralförmige Schlitz mit isolierendem Material gefüllt wird. Nach dem zweiten Verfahren erfolgt eine Trockenätzung auf einer Isolierschicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der Schicht zu bilden, der dann mit leitendem Material gefüllt wird.

Das erste Verfahren läßt sich in zwei Varianten ausführen. Nach der ersten Variante wird der spiralförmige Schlitz mit isolierendem Material gefüllt. Bei der zweiten Variante wird der Schlitz teilweise gefüllt, so daß in dem sich ergebenden Spulenleiter ein Hohlraum gebildet wird. Die erste Variante fällt unter den ersten Aspekt der Erfindung, während die zweite Variante unter den zweiten Aspekt der Erfindung fällt.

Gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung wird die spiralförmige planare Spule auf folgende Weise hergestellt: Zunächst wird auf einer Isolierschicht eine leitende Schicht gebildet. Dann wird auf der leitenden Schicht eine Maskenschicht gebildet. Die Maskenschicht wird bearbeitet, damit in der Maskenschicht ein spiralförmiger Schlitz gebildet wird. Mit Hilfe dieser Maskenschicht wird ein in hohem Maße richtungsgebundenes Trockenätzen durchgeführt, zum Beispiel Ionenstrahlätzen, ECR-Plasma-Ätzen, reaktives Ionenätzen der leitenden Schicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der leitenden Schicht und gleichzeitig einen Spulenleiter mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  von 1 oder mehr auszubilden. Es ist erforderlich, daß die Ätzgeschwindigkeit der Maskenschicht sich stark von derjenigen der Leiterschicht unterscheidet, so daß vertikales anisotropes Ätzen erreicht wird.

Um auf dem Spulenleiter mit einem hohen Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  eine Isolierschicht zu bilden, ist es wünschenswert, daß die Lücke zwischen den Windungen mit Isoliermaterial gefüllt wird, das einen kleinen Dielektrizitätskoeffizienten aufweist, während die Masse des Isoliermaterials so bearbeitet wird, daß eine flache Oberseite entsteht. Ist das Isoliermaterial ein anorganischer Stoff, wie beispielsweise  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , so wird zur Bildung der Isolierschicht das CVD-Verfahren oder das Aufsprühverfahren eingesetzt (zum Beispiel das reaktive Zerstäuben oder das Zerstäuben unter Vorspannung). Handelt es sich bei dem Isoliermaterial um einen organischen Stoff, so ist Polyimid bevorzugt (einschließlich eines fotoempfindlichen Stoffs). Statt dessen kann auch ein Resistmaterial verwendet werden. Das isolierende Material, sei es organisch, sei es anorganisch, wird mit einem Lösungsmittel gemischt, um eine Lösung zu erhalten. Die Lösung wird im Schleuderverfahren auf das Substrat aufgebracht. Die Beschichtung wird mittels eines geeigneten Verfahrens ausgehärtet, so daß sich die Isolierschicht ausbildet. Die so gebildete Isolierschicht wird in der Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters einem Rück-Ätz-Prozeß ausgesetzt, so daß eine flache Oberseite entsteht.

Das zweite Verfahren zur Bildung der spiralförmigen planaren Spule, welches unter den zweiten Aspekt der Erfindung fällt, wird im folgenden erläutert. Bei diesem Verfahren wird zunächst eine Isolierschicht gebildet. Auf der Isolierschicht wird ein Resistmaterial mit einem Muster versehen. Unter Verwendung des Resistmaterials als Maske erfolgt selektives Trockenätzen der Isolierschicht, um so einen spiralförmigen Schlitz in der Isolierschicht zu erhalten. Dann wird auf dem mit Muster versehenen Resistmaterial und in dem spiralförmigen Schlitz durch Kathodenzerstäubung, mittels CVD-Verfahren, Aufdampfen im Vakuum oder dergleichen eine leitende Schicht gebildet. Als nächstes wird das Resistmaterial von der Isolierschicht und der leitenden Schicht mittels eines

Abhebeverfahrens entfernt. Gleichzeitig werden solche Abschnitte der leitenden Schicht entfernt, die sich auf dem Resistmaterial befinden. Im Ergebnis entsteht eine spiralförmige planare Spule.

Welches von dem ersten oder zweiten Verfahren zur Bildung der spiralförmigen planaren Spule verwendet wird, hängt von dem Muster der planaren Spule ab.

Im folgenden werden die Vorteile der magnetischen Elemente gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung erläutert.

Fig. 9 zeigt die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis der planaren Induktivität gemäß Fig. 5 zu deren Spulenwiderstand, und außerdem den Induktivitätswert der Induktivität. Der Parameter der Induktivität  $L$  ist  $\mu_s t$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der Magnetschichten 30A und 30B und  $t$  die Schichtdicke ist. Im vorliegenden Fall beträgt  $\mu_s t = 5000 \mu\text{m}$  oder  $1000 \mu\text{m}$ . Wie aus Fig. 9 ersichtlich ist, ist der Induktivitätswert  $L$  der planaren Induktivität praktisch konstant, unabhängig von dem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$ . Der Widerstand der spiralförmigen planaren Spule 40 ist umgekehrt proportional zu dem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  und bleibt praktisch konstant, wenn das Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  den Wert 5 überschreitet.

Fig. 10 zeigt die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis der Induktivität gemäß Fig. 5 zu dem  $L/R$ -Wert.  $L/R$  ist eine physikalische Größe, die proportional zu dem Gütekoeffizienten  $Q$  der Induktivität ist, der seinerseits definiert ist durch  $Q = 2l f L/R$  mit  $f$  als Frequenz (Hz). In Fig. 10 ist die Beziehung für zwei Parameter dargestellt, nämlich die relativen Permeabilitäten  $\mu_s$  von  $10^4$  und  $10^5$  jeder der beiden magnetischen Schichten. Wie aus Fig. 10 ersichtlich ist, nimmt  $L/R$  mit zunehmendem Lücken-Geometrie-Verhältnis  $h/b$  zu, nicht jedoch über den Wert 5 hinaus, auch wenn das Verhältnis  $h/b$  weiter zunimmt.

Die Erfinder haben planare Induktivitäten des in Fig. 5 dargestellten Typs mit unterschiedlichen Lücken-Geometrie-Verhältnissen von 0,3; 0,5; 1,0; 2,0 und 5,0 hergestellt. Einige dieser Induktivitäten haben einen Parameter  $\mu_s t$  von  $5000 \mu\text{m}$ , der Rest hat einen Parameter  $\mu_s t$  von  $1000 \mu\text{m}$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität jeder der Magnetschichten und  $t$  deren Dicke ist. Die Erfinder haben diese planaren Induktivitäten geprüft, um zu sehen, wie deren Gütekoeffizienten  $Q$  von dem Lücken-Geometrie-Verhältnis abhängen. Die Testergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle niedergelegt:

Verhältnis $h/b$	$Q(f = 5 \text{ MHz})$	
	$\mu_s (\mu\text{m})$ $5 \times 10^3$	$1 \times 10^3$
0,3	5,5	1,4
0,5	13,5	3,3
1,0	19,8	4,9
2,0	22,9	5,7
5,0	25,0	6,3

Wie aus der Tabelle ersichtlich, ist der Koeffizient  $Q$  der planaren Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 1 etwa 3,5mal größer als derjenige der Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 0,3, und etwa 1,5mal größer als derjenige einer Induktivität mit einem Lücken-Geometrie-Verhältnis von 0,5. Offensichtlich kann jede Induktivität des in Fig. 5 dargestellten Typs einen ausreichend großen Gütekoeffizienten  $Q$  besitzen, wenn ihr Lücken-Geometrie-Verhältnis 1 oder mehr beträgt.

Fig. 11 veranschaulicht die Beziehung zwischen dem Lücken-Geometrie-Verhältnis des planaren Transformators nach Fig. 7 und dessen Verstärkung. Wie die Fig. zeigt, kann der Transformator einen ausreichend großen Koeffizienten  $Q$  und mithin eine ausreichend große Verstärkung besitzen, wenn das Lücken-Geometrie-Verhältnis 1 oder mehr beträgt.

Eine der Determinanten für die Fähigkeit eines magnetischen Elements ist das Material des Elements. Folglich ist es wichtig, welches Material zur Bildung des magnetischen Elements verwendet wird. Dieser Punkt wird am Ende der Beschreibung weiter ausgeführt. Verschiedene planare magnetische Elemente gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, die gekennzeichnet sind durch ihr spezielles Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  ( $h$  ist die Höhe des Spulenleiters, und  $d$  ist dessen Breite), sollen im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 12A bis 22 erläutert werden.

Fig. 12A ist eine auseinandergezogene Darstellung eines planaren magnetischen Elements. Fig. 12B ist eine Schnittansicht entlang der Linie 12B-12B in Fig. 12A. Das planare magnetische Element hat nicht nur ein höheres Leiter-Geometrie-Verhältnis, sondern auch ein höheres Lücken-Geometrie-Verhältnis. Deshalb fällt das Element sowohl unter den ersten als auch unter den zweiten Aspekt der Erfindung.

Wie in den Fig. 12A und 12B gezeigt ist, enthält das planare magnetische Element ein Substrat 10 und eine spiralförmige planare Spule 40, die direkt auf dem Substrat 10 liegt. Der Spulenleiter 42 (Fig. 12B) kann durch ein bekanntes Verfahren ausgebildet werden, wie es üblicherweise bei der Ausbildung der Verdrahtung in Halbleiterbauelementen eingesetzt wird. Je kleiner die Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters 24, desto kleiner ist das planare magnetische Element. Allerdings gilt auch: je kleiner die Lücke, desto schwieriger ist es für das Element, ein ausreichend hohes Leiter-Geometrie-Verhältnis zu besitzen. Damit wird gefordert, daß eine Lücke zunächst auf den am meisten geeigneten Wert für den Einsatz des Elements festgelegt wird, so daß anschließend das Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  bestimmt wird. Gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beträgt das Leiter-Geometrie-Verhältnis  $h/d$  mindestens 1. In anderen Worten: der Spulenleiter 42 besitzt eine Höhe, die gleich oder größer ist als die Breite  $d$ . Um das planare magnetische Element zu miniaturisieren, ist es



selbstverständlich wünschenswert, daß das Lücken-Geometrieverhältnis  $h/b$  so groß wie möglich ist. In der Praxis allerdings ist es zu empfehlen, daß sowohl die Breite  $d$  des Leiters 42 als auch die Lücke  $b$  zwischen den Windungen jeweils etwa  $10\text{ }\mu\text{m}$  oder weniger betragen.

- Um einen Spulenleiter mit einem hohen Geometrieverhältnis  $h/d$  herzustellen, muß man einen schmalen Spiralabschnitt einer dicken leitenden Schicht ätzen. Damit ist es zu bevorzugen, als leitende Schicht eine Kristallschicht mit einer einfach zu ätzenden Ebene parallel zur Schicht selbst zur Verfügung zu haben. Selbstverständlich ist eine Einkristallschicht am meisten zu bevorzugen.

- Abgesehen von seiner Struktur kann das planare magnetische Element gemäß Fig. 12A und 12B eine unzureichende Induktivität besitzen, wenn es zu klein ist. Dennoch kann seine Reaktanz  $HL$  ( $H$  ist die Kreisfrequenz) erhöht werden, indem das Element mit hoher Schaltfrequenz betrieben wird. In jüngster Zeit werden magnetische Elemente mit immer höheren Schaltfrequenzen betrieben. Die Reaktanz des in den Fig. 12A und 12B gezeigten planaren magnetischen Elements bereitet keinerlei Probleme, wenn aufgrund der Miniaturisierung des Elements eine Unzulänglichkeit entsteht. Die elektrische Induktivität kann die Funktion in einem Hochfrequenzbereich (zum Beispiel einige MHz) auch dann übernehmen, wenn die Induktivität nur im Bereich von  $nH$  liegt.

- Wenn die Windungen eines Spulenleiters mit hohem Geometrieverhältnis  $h/d$  einander eng benachbart sind, ist die Zwischenwindungs-Kapazität groß wegen des schmalen Spalts zwischen zwei benachbarten Windungen und den relativ großen, einander gegenüberliegenden Flächen. Wegen der großen Zwischenwindungs-Kapazität kann das planare magnetische Element in einen LC-Kreis eingebaut werden. In den meisten Fällen jedoch verringert die Verwendung des Elements die LC-Resonanzfrequenz (allgemein als "Eckfrequenz" oder "Grenzfrequenz" bezeichnet), und das Element kann nicht länger als Induktivität arbeiten. Daher muß man die Zwischenwindungs-Kapazität auf ein Minimum herabsetzen. Diese Kapazität läßt sich dadurch reduzieren, daß man eine Isolierschicht (zum Beispiel aus  $\text{SiO}_2$ ) vorsieht, die eine Ausnehmung oder einen Hohlraum hat, der sich zwischen den Windungen des Spulenleiters erstreckt und den dielektrischen Koeffizienten zwischen den Windungen herabsetzt. Der Hohlraum kann Vakuum enthalten oder mit einem Gas gefüllt sein, das bei der Bildung der Isolierschicht verwendet wird. In jedem Fall ist der Zwischenwindungs-Dielektrizitätskoeffizient viel kleiner als dann, wenn die Lücke zwischen den Windungen mit dem Isoliermaterial gefüllt ist.

- Zur Bildung einer Isolierschicht mit einem solchen Hohlraum reicht es aus, das CVD-Verfahren anzuwenden, wie es bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen üblich ist. Die Lücke zwischen den Windungen des Spulenleiters wird nicht vollständig mit dem Isoliermaterial (zum Beispiel  $\text{SiO}_2$ ) aufgefüllt, wie es bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen der Fall ist. Vielmehr wird eine Isolierschicht mit zunehmender Dicke durch Wachstum zuerst auf der Oberseite des Spulenleiters und dann auf den Seiten des oberen Abschnitts jeder Windung gebildet. Die Schicht an den Seiten jeder Windung wird wachsen gelassen, bis sie die Öffnung der Lücke zwischen den Windungen schließt. Um auf diese spezielle Weise die Isolierschicht durch Wachstum zu bilden, reicht es aus, die Gaszuführgeschwindigkeit auf einen geeigneten Wert einzustellen.

- Wie aus Fig. 13A hervorgeht, wird das Materialgas 82 auf den Spulenleiter 42 auf dem Substrat 10 aufgebracht. Für das Gas 82 ist es schwierig, bis zum Boden der Lücke zwischen den Spulenwindungen zu strömen. Folglich wächst rasch eine Isolierschicht 80 oben auf jeder Windung 42, die Isolierschicht wächst weniger rasch an den Seiten des oberen Abschnitts, wie in Fig. 13B zu sehen ist. Die Schicht 80 wächst oben an jeder Windung 42 dicker und schneller und wächst an den Seiten des oberen Abschnitts der Windung langsam. Wie in Fig. 13C gezeigt ist, berührt die Schicht 80 die an der nächsten Windung sich bildende Schicht. Die Schicht 80 wächst weiter und schließt die Öffnung zwischen den Windungen 42. Als Ergebnis ergibt sich die in Fig. 13D dargestellte Struktur, bei der ein Hohlraum 70 sich zwischen den Windungen des Spulenleiters 42 erstreckt.

- Eine Isolierschicht mit einem Hohlraum kann auch mittels Zerstäubung gebildet werden, wie Fig. 14 zeigt. Genauer gesagt, Partikel des isolierenden Materials werden schräg auf einen Spulenleiter 42 unter einem Winkel  $\theta$  oben auf die Oberseite des Leiters 42 aufgestäubt. Die durch Aufstäuben gebildete Isolierschicht ist weniger glatt als die nach dem CVD-Verfahren gebildete Isolierschicht. Deshalb ist das Zerstäubungsverfahren nicht so empfehlenswert.

- Die Herabsetzung der Zwischenwindungs-Kapazität, die sich aus dem sich zwischen den Windungen des Spulenleiters 42 erstreckenden Hohlraum 70 ergibt, soll unter Bezugnahme auf Fig. 15 erläutert werden, die einen planaren Kondensator gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung veranschaulicht, welcher zwei parallele Kondensatoreinheiten umfaßt.

- Die obere Einheit enthält ein Isolierelement 20 und eine Elektrode 60B auf der Oberseite des Elements 20. Die untere Einheit enthält ein Isolierelement 20 und eine auf dessen Unterseite gebildete Elektrode 60A. Die Kondensatoreinheiten besitzen die gleiche Größe  $r(m) \times t(m)$ . Die Isolierelemente 20 haben eine Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$ . Sie sind um einen Abstand  $s$  voneinander entfernt. Wenn der Spalt  $s_0$  zwischen den Elektroden 60A und 60B mit dem gleichen Isolierstoff gefüllt wird, aus dem die Elemente 20 bestehen, sollte der Kondensator folgende Kapazität  $C_0$  aufweisen:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon t / s_0$$

wobei  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante von Vakuum ist.

Das Verhältnis der Kapazität  $C$  dieses Kondensators zu der Kapazität  $C_0$  ist folgendermaßen gegeben:

$$C/C_0 = 1/(k(\epsilon - 1) + 1)$$

wobei  $k$  das Verhältnis  $s/s_0$ , das heißt das Verhältnis des Volumens eines Hohlraums zu dem Raum  $s_0$  ist.

Fig. 16 zeigt, wie das Verhältnis  $C/C_0$  abhängt von dem Verhältnis  $K$ , wenn die Isolierelemente 20 aus  $\text{SiO}_2$



bestehen, dessen spezifische Dielektrizitätskonstante etwa 4 beträgt. Angenommen,  $k$  betrage  $1/3$  oder weniger, so ist die Kapazität  $C$  etwa  $1/2 C_0$  oder weniger. Unabhängig davon, ob die Lücke 70 zwischen den Isolierelementen 70 mit Gas gefüllt ist oder Vakuum enthält, sollte die Lücke wünschenswerterweise 1 oder mehr von dem Spalt  $s_0$  betragen.

Die planare Spule 40 (Fig. 12A) ist in eine planare Induktivität eingebaut. Diese Spule 40 hat nur einen unzureichenden Induktivitätswert. Deshalb ist es wünschenswert, daß eine magnetische Schicht so nahe wie möglich an der planaren Spule 40 angeordnet wird, so daß die magnetische Schicht als Magnetkern dienen kann. Um den Leckfluß auf ein Minimum zu reduzieren, sollte die Spule 40 besser zwischen zwei magnetischen Schichten liegen, wie dies in Fig. 17 gezeigt ist.

Wie aus Fig. 17 hervorgeht, enthält diese planare Induktivität ein beispielsweise aus Silicium bestehendes, isolierendes Substrat 10, eine magnetische Schicht 30A auf dem Substrat 10, eine auf der magnetischen Schicht 30A gebildete Isolierschicht 20A, eine auf der Isolierschicht 20A gebildete planare Spule 40, eine oben auf der Spule 40 befindliche Isolierschicht 20B und eine magnetische Schicht 30B. Die magnetischen Schichten 30A und 30B fungieren auch als magnetische Abschirmungen und reduzieren den Leckfluß auf praktisch null. Da praktisch keine Magnetflüsse aus der planaren Induktivität herauslecken, können andere elektronische Elemente in enger Nachbarschaft zu der planaren Induktivität angeordnet werden. Die planare Induktivität des in Fig. 17 dargestellten Typs trägt also wesentlich bei zur Miniaturisierung elektronischer Bauelemente.

Für einige spezielle Anwendungsfälle kann die in Fig. 17 dargestellte planare Induktivität modifiziert werden, indem eine oder beide magnetische Schichten 20A und 20B, die hier als Kerne dienen, entfernt werden.

Fig. 18 zeigt eine modifizierte Form der in Fig. 17 gezeigten planaren Induktivität. Diese Induktivität ist durch zwei Besonderheiten gekennzeichnet. Erstens besteht die Spule 40 aus drei übereinander angeordneten Einheiten. Zweitens werden zwei zusätzliche Isolierschichten 20C verwendet, die jeweils zwischen zwei benachbarten Spuleneinheiten 42 liegen. Offensichtlich besitzt die planare Spule 40 mehr Windungen als die Spule 40, die in der planaren Induktivität gemäß Fig. 17 eingebaut ist. Folglich kann die Induktivität gemäß Fig. 18 einen höheren Induktivitätswert besitzen, als die planare Spule gemäß Fig. 17.

In die erfindungsgemäßen planaren magnetischen Elemente lassen sich planare Spulen verschiedener Formen einbauen. Eine Form ist die in Fig. 19A dargestellte spiralförmige planare Spule. Eine andere Form ist die in Fig. 19B dargestellte mäanderförmige planare Spule. Die Spiralspule ist deshalb vorzuziehen bei planaren magnetischen Elementen, bei denen ein hoher Induktivitätswert erforderlich ist.

Grundsätzlich besitzen Spulenleiter 42 für die Verwendung in planaren magnetischen Elementen eine Höhe, die wesentlich größer ist als bei Leitern in Halbleiterbauelementen. Deshalb müssen einige Maßnahmen getroffen werden, um einen Spulenleiter 42 fest an dem Substrat zu halten. Man kann eine Bindschicht vorsehen, um den Leiter 42 an das Substrat zu binden, wie es in Fig. 20 gezeigt ist. Dort ist eine beispielsweise als Cr ausgebildete Bindschicht 25 mit dem gleichen Muster wie der Spulenleiter 42 auf einem Substrat 10 ausgebildet, wobei der Leiter 42 auf der Bindschicht 25 gebildet ist. Dieses Verfahren kann man auch auf die planaren Elemente gemäß dem ersten, dem dritten, dem vierten und dem fünften Aspekt der Erfindung anwenden.

Selbstverständlich muß der Spulenleiter 42 abhängig vom Verwendungszweck des planaren magnetischen Elements, in welches er eingebaut wird, ausgelegt werden. Folglich müssen die Windungs-Schrittweite, das Geometrieverhältnis  $h/d$  und weitere Merkmale des Leiters 42 abhängig vom Zweck festgelegt werden, für den das planare magnetische Element vorgesehen ist. Um die Größe des Elements zu reduzieren, ist es erforderlich, daß die Lücke  $b$  zwischen zwei benachbarten Windungen kleiner ist als die Breite  $d$  des Leiters 42. Es gibt keine besondere Beschränkung hinsichtlich der Lücke  $b$ , jedoch ist eine Lücke  $b$  von  $10\text{ }\mu\text{m}$  oder weniger empfehlenswert, nicht nur für die Elemente gemäß dem zweiten Aspekt, sondern auch für diejenigen gemäß den anderen Aspekten der Erfindung.

Die Beschreibung des zweiten Aspekts der Erfindung wurde beschränkt auf planare Induktivitäten mit jeweils einer planaren Spule. Allerdings ist der zweite Aspekt der Erfindung nicht auf planare Induktivitäten mit nur einer Spule beschränkt. Mikrotransformatoren mit jeweils zwei planaren Spulen fallen ebenfalls unter den zweiten Aspekt der Erfindung.

Fig. 21 zeigt einen solchen Mikrotransformator. Er enthält ein Substrat 10, drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B und zwei planare Spulen 40A und 40B. Das Substrat 10 besteht aus Silicium oder dergleichen. Die magnetische Schicht 30A ist auf dem Substrat 10 gebildet, die Isolierschicht 20A befindet sich auf der Schicht 30A. Die planare Spule 40A, die als Primärspule fungiert, ist auf der Schicht 20A. Die Isolierschicht 20B deckt die Spule 40A ab. Die planare Spule 40B, die als Sekundärspule fungiert, ist auf der Isolierschicht 20B angeordnet. Die Isolierschicht 20C bedeckt die Spule 40B. Die Magnetschicht 30B ist auf der Isolierschicht 20C gebildet. Die Magnetschichten 30A und 30B umschließen die die Primär- und Sekundärspulen umfassende Einheit sandwichartig.

Die Primärspule 40A und die Sekundärspule 40B können in derselben Ebene angeordnet werden, wie es in Fig. 22A gezeigt ist. Die Sekundärspule 40B erstreckt sich zwischen den Windungen der Primärspule 40A. Alternativ kann die Sekundärspule 40B in einem Bereich angeordnet werden, der von der Primärspule 40A bedeckt ist, wie dies in Fig. 22B gezeigt ist.

Im folgenden soll unter Bezugnahme auf die Fig. 23 bis 28 der dritte Aspekt der Erfindung beschrieben werden.

Fig. 23 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität gemäß dem dritten Aspekt. Wie in Fig. 23 gezeigt ist, umfaßt diese Induktivität zwei Isolierschichten 20A und 20B, zwei magnetische Schichten 30A und 30B und eine spiralförmige planare Spule 40, die sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20A und 20B eingefaßt ist, die aus den Schichten 20A und 20B sowie der Spule 40 bestehende Einheit wird sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30A und 30B eingefaßt. Die spiralförmige planare Spule 40 ist quadratisch, wobei jede Seite eine Länge  $a_0$  hat. Außerdem sind auch die magnetischen Schichten 30A und 30B quadratisch

mit einer Seitenlänge von  $j$  weils  $w$ . Sie haben die gleiche Dicke  $t$ . Sie sind von inander um ein Stück  $g$  beabstandet.

Fig. 24 ist ebenfalls eine auseinandergezogene Darstellung eines anderen Typs einer planaren Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung. Diese planare Induktivität enthält drei Isolierschichten 20A, 20B und 20C, zwei magnetische Schichten 30A und 30B, zwei spiralförmige planare Spulen 40A und 40B und eine Durchkontaktierung 42. Die Isolierschicht 20C befindet sich zwischen den Spulen 40A und 40B. Die aus der Schicht 20C und den Spulen 40A und 40B bestehende Einheit ist sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20A und 20B eingefaßt. Die aus den Schichten 20A, 20B und 20C sowie den Spulen 40A und 40B bestehende Einheit ist sandwichartig zwischen den Magnetschichten 30A und 30B eingefaßt. Die Durchkontaktierung 42 erstreckt sich durch die Isolierschicht 20C und verbindet elektrisch die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B. Die spiralförmigen planaren Spulen 40A und 40B sind quadratisch ausgebildet jeweils mit einer Seitenlänge von  $a_0$ . Außerdem sind die magnetischen Schichten 30A und 30B quadratisch mit einer Seitenlänge  $w$  und gleicher Dicke  $t$  ausgebildet. Die Schichten 30A und 30B sind um ein Stück  $g$  von einander beabstandet.

Die beiden in den Fig. 23 und 24 dargestellten planaren Induktivitäten sind hinsichtlich folgender Gesichtspunkte vorteilhaft, wenn geeignete Werte für  $a_0$ ,  $w$ ,  $t$  und  $g$  gewählt werden:

- 1) sie besitzen eine wirksame magnetische Abschirmung, so daß deshalb der Leckfluß sehr klein ist.
- 2) sie besitzen einen ausreichend hohen Induktivitätswert.

Jede planare Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung kann mit Hilfe der oben beschriebenen Dünnschichttechnik auf einem Glassubstrat gebildet sein. Alternativ können die Elemente auf einem anderen isolierenden Substrat gebildet werden (zum Beispiel einem Substrat aus einem hochmolekularen Material, zum Beispiel Polyimid).

Die von der spiralförmigen planaren Spule oder den Spulen erzeugten magnetischen Flüsse müssen daran gehindert werden, aus den in Fig. 23 und 24 dargestellten planaren Induktivitäten zu entweichen, weil sonst die Leckflüsse aus den Induktivitäten abträglich die anderen elektronischen Komponenten beeinflussen könnten, die sehr dicht bei der Induktivität auf demselben Chip angeordnet sind, wodurch eine integrierte Hybridschaltung gebildet wird. Gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung ist das Verhältnis zwischen der Breite  $w$  jeder Magnetschicht und der Breite  $a_0$  der quadratischen planaren Spule oder den Spulen möglichst auf einen optimalen Wert eingestellt, damit die von der Spule oder den Spulen erzeugten magnetischen Flüsse an einem Lecken gehindert werden.

Die Fig. 25A bis 25C zeigen Schnittansichten von drei planaren Induktivitäten des in Fig. 23 dargestellten Typs, wobei unterschiedliche Werte  $w$  für die magnetischen Schichten gewählt sind, und wobei verdeutlicht ist, wie die magnetischen Flüsse 100 aus diesen planaren Induktivitäten entweichen. Bei der in Fig. 25A dargestellten Induktivität ist die Breite  $w$  jeder magnetischen Schicht im wesentlichen gleich der Breite  $a_0$  der spiralförmigen Spule 40. Bei der in Fig. 25B gezeigten Induktivität ist die Breite  $w$  etwas größer als die Breite  $a_0$  der Spule 40. Bei der Induktivität nach Fig. 25C ist die Breite  $w$  viel größer als die Breite  $a_0$  der spiralförmigen Spule 40. Wie aus den Fig. 25A, 25B und 25C hervorgeht, sind die Leckflüsse umso kleiner, je breiter jede magnetische Schicht ist.

Fig. 26 ist ein Diagramm, welches die Verteilung der magnetischen Flüsse an den Kanten der spiralförmigen planaren Spule 40 der in Fig. 23 dargestellten Induktivität veranschaulicht. Wie aus Fig. 26 ersichtlich ist, ist das magnetische Feld etwa um das 0,37-fache kleiner an einem Punkt, der von jeder Kante der Spule 40 einen Abstand  $\alpha$  hat, bezogen auf das magnetische Feld an der Kante der Spule 40. Der Abstand  $\alpha$  ist:  $\alpha = (\mu_s g t/2)^{1/2}$ , wobei  $\mu_s$  die relative Permeabilität der magnetischen Schichten 30,  $t$  die Schichtdicke und  $g$  der Abstand zwischen den Schichten ist. Damit ist in der planaren Induktivität gemäß Fig. 23 die Breite  $w$  jeder magnetischen Schicht größer um  $2\alpha$  oder mehr, wodurch die Leckflüsse drastisch herabgesetzt werden. Der die Spule 40 bildende Spulenleiter 42 besitzt eine Breite  $d$  von 70  $\mu\text{m}$  und eine Zwischenwindungs-Lücke  $b$  von 10  $\mu\text{m}$ , wobei der Abstand  $g$  zwischen den magnetischen Schichten 5  $\mu\text{m}$  und der Spulenstrom 0,1 A beträgt.

Fig. 27 zeigt die Beziehung zwischen der Breite  $w$  der magnetischen Elemente in der Induktivität nach Fig. 23 und dem Streuen der Magnetflüsse von der Kante jeder Magnetschicht. Wie aus Fig. 27 ersichtlich ist, ist der Leckfluß umso kleiner, desto größer die Breite  $w$  ist. Es ist wünschenswert, daß die Breite  $w$  den Wert  $a_0 + 10\alpha$  oder mehr aufweist. Wenn die Breite  $w$  den Wert  $a_0 + 10\alpha$  hat, kommen von der planaren Induktivität praktisch keine magnetischen Leckflüsse.

Es wird gefordert, daß die planare Induktivität einen möglichst hohen Induktivitätswert aufweist. Die planare Induktivität gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung kann nur dann einen hohen Induktivitätswert besitzen, wenn die magnetischen Schichten eine Breite  $w$  haben, die um  $2\alpha$  oder mehr größer ist als die Breite  $a_0$  der planaren Spule. Fig. 28 zeigt die Beziehung zwischen der Breite  $w$  und dem Induktivitätswert der in Fig. 23 dargestellten Spulenordnung. Wie aus Fig. 28 entnehmbar ist, steigt der Induktivitätswert auf das 1,8-fache oder mehr an, wenn die Breite  $w$  von  $a_0$  auf  $a_0 + 2\alpha$  oder mehr erhöht wird.

Im folgenden sollen unter Bezugnahme auf die Fig. 29 bis 48 planare magnetische Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung beschrieben werden. Obschon die beschriebenen Elemente lediglich planare Induktivitäten enthalten, können die planaren magnetischen Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung auch planare Transformatoren enthalten. Jeder planare Transformator, der zu dem vierten Aspekt der Erfindung gehört, ist in der Struktur im wesentlichen gleich der planaren Spulenordnung, mit der Ausnahme, daß die Primärspule und die Sekundärspule übereinander angeordnet sind.

Fig. 29 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer ersten planaren Induktivität gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung. Wie aus Fig. 29 ersichtlich ist, enthält diese Induktivität zwei magnetische Schichten 30, zwei Isolierschichten 20 und eine spiralförmige planare Spule 40, die zwischen den Isolierschichten 20 sandwich-

artig eingefaßt ist. Die aus den Schichten 20 und der Spule 40 gebildete Einheit ist sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30 eingefaßt. Die magnetischen Schichten 30 weisen eine uniaxiale magnetische Anisotropie auf. Sie besitzen eine Achse leichter Magnetisierung, die durch einen Pfeil angedeutet ist.

Wenn durch die spiralförmige planare Spule 40 ein Strom fließt, erzeugt die Spule 40 ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld erstreckt sich durch jede Magnetschicht 30 in vier Richtungen, die in Fig. 30 durch Pfeile angedeutet sind. In der Zone A in Fig. 30 erstreckt sich das Magnetfeld in Linien parallel zur Achse der leichten Magnetisierung der magnetischen Schicht 30. In den Zonen B verläuft das Magnetfeld in Linien, welche die Achse der leichten Magnetisierung schneiden, oder parallel zu der Achse der schweren Magnetisierung der magnetischen Schicht sind.

Fig. 31 zeigt eine B-H-Magnetisierungskurve in der Achse leichter Magnetisierung für beide Schichten 30 in der in Fig. 29 gezeigten Induktivität, außerdem eine B-H-Magnetisierungskurve in der Achse schwerer Magnetisierung der Magnetschicht. Wie aus Fig. 31 ersichtlich ist, zeigt die magnetische Schicht eine sehr hohe Permeabilität in der Achse leichter Magnetisierung und kann mithin in der Achse leichter Magnetisierung gesättigt werden, und kann in der Achse schwerer Magnetisierung kaum gesättigt werden. Daraus folgt, daß die Zonen A (Fig. 30) leicht magnetisch gesättigt werden können, wohingegen die Zonen B (Fig. 30) schwer magnetisch zu sättigen sind. Wenn das von der Spule 40 erzeugte Magnetfeld stark ist, sind die Zonen A jeder magnetischen Schicht 30 gesättigt, und aus der Schicht 30 erfolgt ein gewisser magnetischer Leckfluß, wie in Fig. 32A angedeutet ist. Die übrigen magnetischen Flüsse verlaufen durch die Zonen B (Fig. 30), wie aus Fig. 32B ersichtlich ist. Offensichtlich hängt der Induktivitätswert dieser planaren Induktivität ab von der Dichte der Magnetflüsse, die entlang der Achse schwerer Magnetisierung in jeder Magnetschicht 30 verlaufen.

Um das Problem der Sättigung der magnetischen Schichten zu lösen, besitzen die planaren Induktivitäten gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung eine der folgenden drei Strukturen:

#### Erste Struktur

Zwei Gruppen von magnetischen Schichten werden unterhalb und oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule angeordnet. Die magnetischen Schichten jeder Gruppe sind derart übereinander angeordnet, daß sich ihre Achsen leichter Magnetisierung schneiden.

#### Zweite Struktur

Unterhalb und oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule befindet sich jeweils eine quadratische magnetische Schicht. Jede Schicht besteht aus vier dreieckigen Stücken, von denen jeweils eine Achse leichter Magnetisierung sich parallel zu der Unterlage erstreckt.

#### Dritte Struktur

Zwei magnetische Schichten befinden sich unterhalb beziehungsweise oberhalb einer spiralförmigen planaren Spule. Jede Magnetschicht besitzt eine spiralförmige Nut, die sich exakt entlang dem spiralförmigen Leiter der Spule erstreckt.

Fig. 33 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität mit der oben erwähnten ersten Struktur. Wie aus Fig. 33 ersichtlich ist, besitzt diese Induktivität zwei Schichtanordnungen oder Lamine, und zwischen den Laminaten ist sandwichartig eine spiralförmige planare Spule 40 angeordnet. Die Lamine haben identischen Aufbau.

Jedes Laminat besitzt zwei Isolierschichten 20A und 20B und zwei magnetische Schichten 30A und 30B. Die Isolierschicht 20A ist an der Spule 40, die magnetische Schicht 30A ist an der Schicht 20A, die Isolierschicht 20B ist an der magnetischen Schicht 30A und die magnetische Schicht 30B ist an der Isolierschicht 20B angeordnet. Die magnetischen Schichten 30A und 30B sind derart angeordnet, daß sich ihre Achsen (Pfeile) leichter Magnetisierung unter rechten Winkeln schneiden.

In jedem Laminat sind diejenigen Zonen der magnetischen Schicht 30A, die sich in der Nähe der Spule 40 befinden, die der Zone A in Fig. 30 entspricht, magnetisch leicht gesättigt, und aus diesen gesättigten Zonen dringt ein gewisser magnetischer Leckfluß. Diese Leckflüsse erstrecken sich durch solche Zonen der magnetischen Schicht 30B, die den Zonen B in Fig. 30 entsprechen. Im Ergebnis erstrecken sich die magnetischen Flüsse entlang den Achsen schwerer Magnetisierung in beiden magnetischen Schichten 30A und 30B, und in jeder Magnetschicht kann kaum eine magnetische Sättigung eintreten.

Fig. 34 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 33 dargestellten planaren Induktivität. Die ausgezogene Linie zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, wohingegen die unterbrochene Kurve die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der in Fig. 29 dargestellten planaren Induktivität veranschaulicht. Wie aus Fig. 34 ersichtlich ist, ist der Induktivitätswert der in Fig. 34 dargestellten Induktivität, die zwei Sätze von magnetischen Schichten besitzt, zweimal so hoch wie der der in Fig. 29 gezeigten Induktivität, die lediglich einen Satz magnetischer Schichten besitzt. Weiterhin zeigt Fig. 34 deutlich, daß der Gleichstrom, bei dem der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 33 abzufallen beginnt, größer ist als der Gleichstrom, bei dem der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 29 abzufallen beginnt.

Fig. 35 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer modifizierten Form der Induktivität gemäß Fig. 33. Diese planare Induktivität unterscheidet sich von derjenigen nach Fig. 33 dadurch, daß jedes Laminat vier magnetische Schichten 30A, 30B, 30C und 30D enthält. Die vier magnetischen Schichten jedes Laminats sind so angeordnet, daß die Achsen leichter Magnetisierung von jeweils benachbarten Schichten sich unter rechten Winkeln schneiden.

Im folgenden soll kurz erläutert werden, wie die Induktivität  $n$  gemäß den Fig. 33 und 35 hergestellt werden. Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder einem Oxid mit einer Dicke von  $3\text{ }\mu\text{m}$  oder mehr vorbereitet. Dann werden die magnetischen Schichten bearbeitet, um ihnen eine uniaxiale magnetische Anisotropie zu verleihen. Die magnetischen Schichten werden derart orientiert, daß die Achsen leichter Magnetisierung von jeweils zwei benachbarten Schichten sich im rechten Winkel schneiden. Zwischen die so orientierten magnetischen Schichten werden Isolierschichten gelegt. Zwischen die beiden innersten Isolierschichten wird eine planare Spule eingelegt. Schließlich werden die Spule, die magnetischen Schichten und die Isolierschichten sämtlich übereinandergelegt, um zusammengepreßt zu werden.

Die magnetischen Schichten können mittels Dünnschichttechnik, beispielsweise Aufdampfen oder Zerstäuben, hergestellt werden. Werden sie in Dünnschichttechnik hergestellt, so erhalten sie die uniaxiale magnetische Anisotropie, während sie in einem elektrostatischen Feld gebildet werden, oder während sie einer Wärmebehandlung in einem Magnetfeld unterzogen werden. Je geringer die Magnetostriction, desto besser. Nichtsdestoweniger kann eine magnetische Schicht, wenn sie aus einem Material mit relativ großer Magnetostriction hergestellt wird, eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufgrund des inversen Magnetostrictionseffekts nur dann erhalten, wenn die Spannungsverteilung in der Schicht geeignet gesteuert wird.

Fig. 36 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität, die die oben erwähnte zweite Struktur besitzt. Wie aus Fig. 36 ersichtlich ist, enthält diese Induktivität zwei Isolierschichten 20, zwei quadratische magnetische Schichten 30 und eine spiralförmige planare Spule 40, die sandwichartig zwischen den Isolierschichten 20 aufgenommen wird. Die aus den Schichten 20 und der Spule 40 bestehende Einheit wird sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30 aufgenommen. Jede magnetische Schicht 30 besteht aus vier dreieckförmigen Stücken, jeweils mit einer Achse der leichten Magnetisierung parallel zu der Grundlinie. Die Achse der leichten Magnetisierung in jedem der dreieckigen Stücke schneidet unter rechtem Winkel die von der Spule 40 erzeugten Magnetflüsse. Deshalb besitzen die magnetischen Schichten 30 keine Zonen, in denen sie leicht magnetisch in Sättigung gehen.

Fig. 37 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie für die in Fig. 36 gezeigte Induktivität. Die ausgezogene Kurve zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, während die gestrichelte Linie die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität gemäß Fig. 29 veranschaulicht. Aus Fig. 34 ist ersichtlich, daß der Induktivitätswert der Induktivität nach Fig. 29 in der Zone geringen Stroms sehr hoch ist, jedoch mit dem Überlagerungs-Gleichstrom abrupt abnimmt und anschließend praktisch konstant bleibt, bis der Überlagerungs-Gleichstrom bis auf einen spezifischen Wert zunimmt. Der Induktivitätswert der Induktivität nach Fig. 36 hingegen, bei der die Magnetschichten keine Zonen besitzen, die relativ leicht in Sättigung gehen, ist etwa zweimal höher als bei der Induktivität nach Fig. 29, und bleibt praktisch ungeachtet des Überlagerungs-Gleichstroms konstant, bis letzterer auf einen spezifischen Wert ansteigt.

Die in Fig. 36 dargestellte planare Induktivität wird folgendermaßen hergestellt: Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder Oxid mit einer Dicke von  $3\text{ }\mu\text{m}$  oder mehr vorbereitet. Diese Schichten werden zu dreieckigen Stücken geschnitten, die jeweils in der Grundlinie länger sind als die Breite der spiralförmigen Spule 40. Die dreieckigen Stücke werden in einem Magnetfeld, welches parallel zu den Grundlinien der dreieckigen Stücke verläuft, wärmebehandelt. Im Ergebnis erhält jedes Stück eine Achse leichter Magnetisierung, die sich parallel zu der Grundlinie erstreckt. Vier solche dreieckigen Stücke, die nun eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufweisen, werden miteinander derart verbunden, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich parallel zu dem spiralförmigen Leiter der planaren Spule 40 erstrecken.

Alternativ können die magnetischen Schichten 30 mittels Dünnschichttechnik ausgebildet werden, zum Beispiel mittels Aufdampfen oder Zerstäuben. Werden sie mittels Dünnschichttechnik gebildet, so benutzt man dreieckige Masken zur Bildung der dreieckigen Stücke. Speziell werden zwei dreieckige Resistmaterial-Masken auf zwei dreieckigen Zonen B eines quadratischen Substrats gebildet. Dann wird auf dem Substrat und auf den Masken eine magnetische Schicht mit vorbestimmter Dicke gebildet, während ein Magnetfeld parallel zu den Grundlinien der Zonen A angelegt wird. Als nächstes werden die Masken von dem Substrat entfernt, und die magnetischen Schichten auf diesen Masken werden gleichzeitig mit abgehoben. Im Ergebnis werden zwei dreieckige magnetische Stücke in den Zonen A des Substrats gebildet, und die dreieckigen Zonen B des Substrats liegen frei. Dann werden zwei dreieckige Resist-Masken auf den dreieckigen Magnetstücken (an den Zonen A) gebildet. Auf den freiliegenden Zonen B und auch auf den Masken wird mit der vorbestimmten Dicke eine magnetische Schicht gebildet, während ein Magnetfeld parallel zu den Zonen B angelegt wird. Danach werden die Masken von den dreieckigen Magnetstücken aus den Zonen A entfernt, und gleichzeitig damit werden die Resist-Masken abgelöst. Damit sind in den Zonen B zwei dreieckige magnetische Stücke gebildet.

Fig. 38 ist eine auseinandergezogene Darstellung einer planaren Induktivität, die die dritte oben erläuterte Struktur besitzt. Wie aus Fig. 38 hervorgeht, umfaßt diese Induktivität ein Substrat 10, zwei Isolierschichten 20, zwei quadratische magnetische Schichten 30 und eine spiralförmige planare Spule 40, die zwischen den Isolierschichten 20 sandwichartig eingefaßt ist. Die durch die Schichten 20 und die Spule 40 gebildete Einheit ist sandwichartig zwischen den magnetischen Schichten 30 eingefaßt, von denen die untere auf dem Substrat 10 liegt. Jede magnetische Schicht 30 besitzt eine spiralförmige Nut, die sich exakt entlang dem spiralförmigen Leiter der Spule 40 erstreckt. Wegen dieser spiralförmigen Nut besitzen die vier dreieckigen Zonen der magnetischen Schicht 3 Achsen leichter Magnetisierung, die von der spiralförmigen Spule 40 erzeugte Magnetflüsse rechtwinklig schneiden. Damit besitzt keine der Magnetschichten 30 Zonen, die leicht in magnetische Sättigung gelangen.

Die in Fig. 38 gezeigten magnetischen Schichten, die mit einer Spiralnute versehen sind, können nach zwei Verfahren hergestellt werden. Bei dem ersten Verfahren wird in der Oberfläche einer Unterlagenplatte eine

Spiralnute gebildet, entweder durch spanabhebende Bearbeitung oder durch Fotolithografie, und auf der Nutfläche der Unterlagenplatte wird eine dünne magnetische Schicht aufgebracht. Bei dem zweiten Verfahren wird eine relativ dicke magnetische Schicht gebildet, und anschließend wird in die Oberfläche der magnetischen Schicht eine Spiralnute eingearbeitet, entweder durch spanabhebende Bearbeitung oder durch Fotolithografie.

Im folgenden soll kurz erklärt werden, warum eine magnetische Schicht magnetische Anisotropie zeigt, wenn in ihre Oberfläche eine Spiralnute eingeschnitten wird. Eine ferromagnetische Schicht besitzt mehrere magnetische Domänen. Eine sehr dünne ferromagnetische Schicht besitzt keine Domänenwand, sondern besitzt eine in Dickenrichtung orientierte magnetische Domäne. Wie aus dem Stand der Technik bekannt ist, haben die magnetischen Momente der magnetischen Domäne den gleichen Betrag und die gleiche Richtung.

Wenn in die Oberfläche der dünnen ferromagnetischen Schicht eine Nut eingeschnitten wird, entstehen magnetische Pole, wodurch ein Endmagnetisierungsfeld oder ein magnetisches Streufeld erzeugt wird. Das so erzeugte magnetische Feld wirkt auf die magnetischen Momente innerhalb der ferromagnetischen Schicht ein und verleiht dieser magnetische Anisotropie. In derselben Weise erhalten dicke magnetische Schichten magnetische Anisotropie, wenn in ihre Oberflächen eine Nut eingearbeitet wird.

Es ist wünschenswert, daß die in der Oberfläche jeder magnetischen Schicht gebildete Spiralnute spezielle Bedingungen erfüllt, die im folgenden anhand der Fig. 39 erläutert werden.

Wie in Fig. 39 zu sehen ist, besitzt die Oberfläche jeder magnetischen Schicht parallele Nuten und parallele Streifen, die alternierend Seite an Seite angeordnet sind. Jeder Streifen besitzt eine Breite  $L$  und eine Höhe  $W$ . Jede Nut hat eine Breite  $\delta$ . Die magnetische Schicht besitzt eine Dicke  $d$ , gemessen vom Boden der Nut aus. Die dreidimensionalen Koordinaten, welche die Position des  $i$ -ten magnetischen Streifens angeben, lauten:

$$x: (L + \delta)(i-1) - L/2 \leq x \leq (L + \delta)(i-1) + L/2$$

$$y: -\infty < y < +\infty$$

$$z: -w/2 \leq z \leq +w/2 \quad (1)$$

Diese Beziehungen repräsentieren eine Oberflächenstruktur, die aus einer definierten Anzahl paralleler Streifen und Nuten besteht, die in X-Achsen-Richtung Seite an Seite angeordnet sind und sich in y-Achsen-Richtung in nicht definierter Weite erstrecken. Die Relationen bedeuten auch, daß der Magnetisierungsvektor  $I$  sich parallel zu der magnetischen Schicht erstreckt, wenn die Schicht eine niedrige magnetische Anisotropie besitzt. Wenn nicht der  $\cos \Theta$  des Vektors  $I$  bezüglich der X-Achse 0 ist, ergeben sich magnetische Pole in der Y-Z-Ebene der magnetischen Schicht. Die Oberflächendichte dieser Pole ist das Produkt aus  $I$  und  $\cos \Theta$ . Das Magnetfeld, welches diese Pole erzeugen, kann analytisch definiert werden als eine Funktion der Koordinaten  $(x, z)$ . Es sei als Beispiel der Magnetstreifen ( $i = 0$ ) betrachtet. Das Endmagnetisierungsfeld  $H_d$ , welches an diesen Magnetstreifen angelegt wird, und das wirksame Magnetfeld  $H_m$ , welches von irgendeinem anderen Magnetstreifen an den Streifen gelegt wird, werden folgendermaßen dargestellt:

$$H_d = \frac{-I \cos \Theta_0}{\mu_0} \left[ \ln \left\{ \frac{\cos \Theta_{0,2}^0 \times \cos \Theta_{0,3}}{\cos \Theta_{0,1} \times \cos \Theta_{0,4}} \right\} \right] \times \frac{1}{2\pi}$$

$$H_m = \frac{-I}{\mu_0} \sum_{i \neq 0} \cos \Theta_i \left[ \ln \left\{ \frac{\cos \Theta_{i,2}^0 \times \cos \Theta_{i,3}}{\cos \Theta_{i,1} \times \cos \Theta_{i,4}} \right\} \right] \times \frac{1}{2\pi}$$

$$\Theta_{i,k} = \tan^{-1} \frac{z + (-1)^k \cdot \frac{w}{2}}{x - j(\delta + L) + \frac{L}{2} \times \sin \left( \frac{\pi}{2} k - \frac{\pi}{4} \right)} \quad (2)$$

wobei  $\Theta_{i,k}$  ist:

Es sei angenommen, daß die statische Energie der Felder  $H_d$  und  $H_m$  als eine Funktion von  $D$  betrachtet werden kann, während sich außerdem der Magnetstreifen ( $i = 0$ ) in einem stabilen Zustand befindet. Dann wird die durchschnittliche Differenz der Energiedichte  $U_k$  pro Flächeneinheit, die durch  $D = 0$  (der Vektor  $I$  ist parallel zu dem Streifen) und  $D = 1/2$  (der Vektor  $I$  ist senkrecht zu dem Streifen) definiert ist, folgendermaßen dargestellt:

$$U_k = v \times \frac{l^2}{\mu_0} \times \left\{ \frac{1}{2} N_{eff} - 2 \sum_{i=1}^{\infty} P_{eff,i} \right\}$$

$$N_{eff} = \frac{2}{\pi L W} \int_0^W d\xi \int_0^L d\eta \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{\xi}{\eta} \right) \right\}$$

$$P_{eff,i} = \frac{-1}{\pi L W} \int_0^W d\xi \int_{(i\delta+L)}^{(i\delta+L)+L} d\eta \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{\xi}{\eta} \right) - \tan^{-1} \frac{\xi}{\eta-1} \right\}$$

Wie daraus ersichtlich ist, besteht die Möglichkeit, magnetische Schichten magnetisch anisotrop zu machen, indem man lediglich in der Oberfläche der magnetischen Schicht eine spiralförmige Nut ausbildet. Um die y-Achse als Achse leichter Magnetisierung zu erhalten, ist es jedoch erforderlich, daß die Achse (entweder  $X = 0$  oder  $Y = 0$ ) jedes magnetischen Streifens eine Achse leichter Magnetisierung ist. Betrachtet man ( $X = 0, Y = 0$ ) in Verbindung mit der Gleichung für  $U_k$  und berücksichtigt  $i = \pm 1$ , so ändert sich die Gleichung für  $U_k$  folgendermaßen:

$$U_k = \frac{v l^2}{\pi \mu_0} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{W}{L} \right) - 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+L} \right) + 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+3L} \right) \right\} \quad (4)$$

Der erste Term der Gleichung (4) ist stets positiv. Ob also  $U_k$  einen positiven oder einen negativen Wert hat, hängt davon ab, ob der zweite Term positiv oder negativ ist. Deshalb kann die magnetische Schicht eine Achse leichter Magnetisierung haben, die sich parallel zu den Magnetstreifen und Nuten erstreckt, und sie kann eine Achse schwerer Magnetisierung aufweisen, die sich rechtwinklig zu den Streifen und Nuten erstreckt, vorausgesetzt, daß die Oberflächenstruktur der magnetischen Schicht folgende Ungleichung erfüllt:

$$\tan^{-1} \left( \frac{W}{L} \right) \geq 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+L} \right) - 2 \tan^{-1} \left( \frac{W}{2\delta+3L} \right) \quad (5)$$

Fig. 40 zeigt die Beziehung zwischen den Parametern der Oberflächenstruktur jeder Magnetschicht der Induktivität (Fig. 38) und dem zweiten Term der Gleichung für  $U_k$ . Wie aus Fig. 40 ersichtlich ist, wird die magnetische Anisotropie umgekehrt, wenn die Höhe  $W$  der Streifen so klein ist wie in dem Fall, in welchem  $\delta/L = 1/16$ . Dann ist es möglich, daß die magnetische Schicht eine Achse leichter Magnetisierung besitzt, die sich rechtwinklig zu den Streifen und Nuten erstreckt.

Im Fall  $W = 0,5 \mu m, \delta = 4 \mu m, L = 2 \mu m$  und  $d = 2 \mu m$ , beträgt die durchschnittliche Energiedifferenz-Dichte  $U_k$  für den nächstliegenden Streifen ( $i = \pm 1$ ) 80 Oe oder mehr, ausgedrückt in der Stärke eines anisotropen Magnetfeldes und beruhend auf der Annahme, daß der Magnetisierungswert 1T beträgt.

Fig. 41 zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität gemäß Fig. 38. Genauer gesagt: Die ausgezogene Kurve zeigt die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivität, während die gestrichelte Linie die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität gemäß Fig. 29 veranschaulicht. Wie aus Fig. 41 ersichtlich ist, ist im Gegensatz zu dem Induktivitätswert der in Fig. 29 gezeigten Induktivität der Induktivitätswert der Induktivität gemäß Fig. 38 praktisch konstant, ungeachtet des überlagerten Gleichstroms, bis der Überlagerungs-Gleichstrom auf einen spezifischen Wert zugenommen hat.

Wie oben erläutert, sind die planaren Induktivitäten gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung frei von dem Problem der Sättigung der magnetischen Schichten, da diese die ersten, die zweite oder die dritte der oben beschriebenen Strukturen aufweisen und mithin die Schichten in ihren jeweiligen Achsen schwerer Magnetisierung magnetisiert sind. Da weiterhin jede magnetische Schicht in ihrer Achse schwerer Magnetisierung magnetisiert ist, unterliegt sie einer Drehmagnetisierung. Daher läßt sich der durch hochfrequenten Wirbelstrom bedingte Verlust stärker reduzieren, als in dem Fall, in welchem jede magnetische Schicht einer Bewegung der Magnetdomänen-Wand unterliegt. Offensichtlich trägt dies bei zur Verbesserung des Frequenzgangs der planaren Induktivität.

Im folgenden werden verschiedene spiralförmige planare Spulen erläutert, die rechtwinklig und nicht quadratisch, wie die bisher beschriebenen Spulen sind, die in den planaren magnetischen Elementen gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung verwendet werden. Wie beschrieben werden wird, sind die Anschlüsse jeder rechtwinkligen planaren Spule leichter nach außen zu führen als bei den quadratischen planaren Spulen.

Hier werden verschiedene planare Induktivitäten, jeweils mit mindestens einer rechtwinkligen spiralförmigen planaren Spule, als planare magnetische Elemente beschrieben. Nicht nur solche planare Induktivitäten, sondern auch planare Transformatoren sind von den planaren magnetischen Elementen gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung umfaßt. Diese planaren Transformatoren sind im Aufbau identisch mit den planaren Induktivität  $n$ , mit der Ausnahme, daß sie eine Primärspule und eine Sekundärspule  $b$  sitzen, die beide rechtwinklige spiralförmige planare Spulen in einer Anordnung übereinander sind, wobei die gleichen Vorteile wie bei den planaren Induktivitäten erzielt werden. Deshalb sollen die planaren Transformatoren nicht im Detail erläutert werden.

Fig. 42A zeigt die Magnetisierungskennlinie einer magnetischen Schicht mit uniaxialer magnetischer Anisotropie. Die Fig. zeigt die B-H-Magnetisierungskurve entlang der Achse einfacher Magnetisierung, außerdem die

B-H-Magnetisierungskurve entlang der Achse schwerer Magnetisierung. Fig. 42B zeigt die Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz, welche die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung zeigt, außerdem zeigt die Fig. die Beziehung zwischen Permeabilität und Frequenz entlang der Achse schwerer Magnetisierung. Wie aus Fig. 42B ersichtlich ist, ist die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung ganz sättigbar, kann jedoch entlang der Achse schwerer Magnetisierung kaum gesättigt werden. Wie ohne weiteres aus Fig. 42B ersichtlich ist, ist die Permeabilität, welche die magnetische Schicht entlang der Achse leichter Magnetisierung zeigt, im niedrigen Frequenzbereich sehr hoch, ist hingegen im Hochfrequenzbereich sehr niedrig. Im Gegensatz dazu ist die Permeabilität, die die Schicht entlang der Achse schwerer Magnetisierung aufweist, im niedrigen Frequenzbereich geringer als die Permeabilität entlang der Achse leichter Magnetisierung, ist jedoch im Hochfrequenzbereich wesentlich höher. Die grafischen Darstellungen in den Fig. 42A und 42B ergeben, daß eine planare Induktivität mit guten elektrischen Eigenschaften hergestellt werden kann, wenn man Gebrauch macht von der konstanten Permeabilität, welche die magnetische Schicht entlang der Achse schwerer Magnetisierung aufweist.

Es gibt drei Arten der Ausnutzung der konstanten Permeabilität der magnetischen Schicht. Diese Arten werden im folgenden einzeln erläutert.

#### Erste Art

Die erste Art besteht darin, eine rechtwinklige spiralförmige planare Spule, zwei die Spule einschließende Isolierschichten und zwei oberhalb und unterhalb der Spule angeordnete magnetische Schichten derart zu verwenden, daß die Achsen schwerer Magnetisierung der magnetischen Schichten mit der Hauptachse der Spule ausgerichtet sind.

Fig. 43A ist eine Draufsicht auf eine planare Induktivität, die nach dem ersten Verfahren hergestellt ist. Fig. 43B ist eine Schnittansicht dieser Induktivität entlang der Linie 43B-43B in Fig. 43A. Wie aus diesen Fig. 43A und 43B hervorgeht, ist eine rechtwinklige, spiralförmige planare Spule 40 zwischen zwei magnetischen Schichten 30 sandwichartig eingefaßt. Die Spule hat ein großes geometrisches Verhältnis (das heißt das Verhältnis der Länge  $m$  der Hauptachse zu der Länge  $n$  der Nebenachse). Je größer das geometrische Verhältnis  $m/n$  ist, desto mehr schneiden von der Spule 40 erzeugte Magnetflüsse rechtwinklig die Achsen der leichten Magnetisierung der magnetischen Schicht, wodurch die elektrischen Eigenschaften der planaren Induktivität verbessert werden. Um die Kennlinien der Induktivität weiter zu verbessern, können die magnetischen Schichten 30 derart verkleinert werden, daß sie lediglich den Mittelabschnitt der Spule 40 abdecken, wie dies in Fig. 44 dargestellt ist.

#### Zweite Art

Die zweite Art ist die, daß zwei rechtwinklige, spiralförmige planare Spulen desselben Typs wie bei der ersten Art hergenommen und in derselben Ebene angeordnet werden, wobei zwei Isolatoren, welche die Spulen sandwichartig einschließen, und zwei Sätze von magnetischen Schichten verwendet werden, jeder Satz bestehend aus zwei übereinanderliegenden magnetischen Schichten über und unter der zugehörigen Spule. Die magnetischen Schichten jedes Satzes sind so angeordnet, daß ihre Magnetisierungsachsen mit der Hauptachse der entsprechenden Spule ausgerichtet sind.

Fig. 45 ist eine Draufsicht auf eine planare Induktivität der zweiten Art, die zwei rechtwinklige, spiralförmige Spulen 40 aufweist, die mit ihren Enden verbunden und entlang ihren Hauptachsen ausgerichtet sind. Diese planare Induktivität besitzt den gleichen Querschnittaufbau wie die Induktivität gemäß Fig. 43B.

Fig. 46A ist eine Draufsicht auf eine weitere planare Induktivität der zweiten Art, die zwei rechtwinklige, spiralförmige Spulen 40 enthält, die Seite an Seite liegend miteinander verbunden sind, wobei ihre Nebenachsen miteinander ausgerichtet sind. Fig. 46B ist eine Schnittansicht entlang der Linie 46B-46B in Fig. 46A, die diese planare Induktivität veranschaulicht.

Es gibt zwei alternative Verfahren zum Verbinden der Spulen 40 Seite an Seite. Nach dem ersten Verfahren werden die Spulen 40 mit ihren in derselben Richtung gewickelten Leitern in der in Fig. 46A dargestellten Weise angeordnet und dann Seite an Seite miteinander verbunden. Bei dem zweiten Verfahren werden die Spulen 40 so angeordnet, daß ihre Leiter in entgegengesetzte Richtungen gewickelt sind, wie aus 47A ersichtlich ist, und anschließend werden sie miteinander Seite an Seite verbunden. Wird vom zweiten Verfahren Gebrauch gemacht, so werden mehr magnetische Wege gebildet, als im Fall des ersten Verfahrens, wie aus Fig. 47B ersichtlich ist. Welches Verfahren vorzuziehen ist, hängt von verschiedenen Bedingungen für die planare Induktivität ab.

Bei den planaren Induktivitäten gemäß den Fig. 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B ist es möglich, größere magnetische Schichten zu verwenden, die die gesamten Spiralspulen 40 bedecken, nicht nur deren mittlere Abschnitte, wie dies in den Fig. 44, 45, 46A und 47A gezeigt ist.

#### Dritte Art

Bei der dritten Art werden die Anschlüsse des Leiters miteinander verbundener rechtwinkliger planarer Spulen freigelegt. Dies erleichtert das Herausführen der Anschlüsse aus der planaren Induktivität.

Wie beschrieben, werden in den planaren Induktivitäten der ersten, der zweiten und der dritten Art zwei rechtwinklige Spiralspulen miteinander verbunden. Daher kann ihr Induktivitätswert zwei- oder mehrfach höher sein als bei der in den Fig. 43A und 43B sowie in Fig. 45 dargestellten Induktivität. Da außerdem die beiden rechtwinkligen Spiralspulen in derselben Ebene liegen, sind keine freiliegenden Drähte für die elektrische Verbindung erforderlich.



Wie aus der Beschreibung hervorgeht, machen die planaren magnetischen Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung wirksamen Gebrauch von der Achse schwerer Magnetisierung jeder in der Induktivität enthaltenen magnetischen Schicht. Die magnetische Schicht erfährt eine Drehmagnetisierung und wird kaum magnetisch gesättigt, so daß dadurch das Hochfrequenzverhalten des planaren magnetischen Elements verbessert wird.

Bei den planaren Induktivitäten gemäß den Fig. 44, 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B ist lediglich eine magnetisch anisotrope Schicht an jeder Seite der spiralförmigen Spule angeordnet. In der Praxis befinden sich zwei oder noch mehr magnetisch anisotrope Schichten an jeder Seite der Spule, so daß ein hoher Induktivitätswert erreicht wird.

Es soll kurz erläutert werden, wie die planaren Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung hergestellt werden. Zunächst werden weichmagnetische Schichten aus einer amorphen Legierung, einer kristallinen Legierung oder einem Oxid mit einer Dicke von 3 µm oder darüber vorbereitet. Diese magnetischen Schichten werden in einem Magnetfeld wärmebehandelt, wodurch sie eine uniaxiale magnetische Anisotropie annehmen. Dann werden die nun magnetisch anisotropen magnetischen Schichten, eine gewünschte Anzahl rechtwinkliger Spiralspulen und Isolierschichten übereinander gestapelt und miteinander verbunden. Es ist wünschenswert, daß die magnetischen Schichten aus einem solchen Material bestehen, daß die Schichten möglichst wenig Spannung ausgesetzt sind, wenn sie mit den Spulen und den Isolierschichten verbunden werden.

Die magnetischen Schichten können in Dünnschichttechnik, zum Beispiel durch Aufdampfen oder Zerstäuben, hergestellt werden.

Werden sie in Dünnschichttechnik hergestellt, so erhalten sie die uniaxiale magnetische Anisotropie, während sie in einem elektrostatischen Feld ausgebildet werden, oder während sie einer Wärmebehandlung in einem Magnetfeld unterzogen werden. Je geringer die Magnetostraktion, desto besser. Nichtsdestoweniger kann eine magnetische Schicht, die aus einem Material mit relativ hoher Magnetostraktion hergestellt wird, eine uniaxiale magnetische Anisotropie durch den inversen Magnetostraktionseffekt erhalten, wenn nur die Spannungsverteilung in der Schicht geeignet gesteuert wird.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung werden modifiziert, so daß man sie in integrierte Schaltungen einbauen kann, zusammen mit anderen Elementen wie Transistoren, Widerständen und Kondensatoren. Speziell werden die Elemente so modifiziert, daß ihre magnetischen Leckflüsse reduziert werden, um ein Versagen der anderen Elemente zu unterbinden. Die planaren Induktivitäten nach den Fig. 44, 45, 46A und 46B sowie 47A und 47B brauchen speziell zusätzliche Elemente, das heißt magnetische Abschirmungen, welche die freiliegenden Teile der Spulenleiter abdecken. Eine solche modifizierte Form soll nun unter Bezugnahme auf die Fig. 48A und 48B erläutert werden, die eine Draufsicht beziehungsweise Schnittansicht zeigen.

Diese modifizierte Form ist gekennzeichnet durch die Verwendung von zwei magnetischen Abschirmungen 32, welche die magnetischen Schichten 30 und außerdem eine rechtwinklige Spiralspule 40 in ihrer Gesamtheit abdecken. Damit sperren die Abschirmungen 32 magnetische Flüsse ab, die aus der Spule 40 herauskommen. In den Fig. 48A und 48B sind für gleiche Teile wie in den Fig. 43A und 43B gleiche Bezugszeichen verwendet.

Im folgenden werden anhand der Fig. 49 bis 61 planare magnetische Elemente gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung beschrieben.

Fig. 49 und 50 sind Draufsichten auf zwei planare Spulen zur Verwendung in planaren magnetischen Elementen gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung.

Die in Fig. 49 dargestellte Spule ist etwa quadratisch, liegt zwischen einem Paar magnetischer Schichten 30 und enthält mehrere Einzelwindungs-Spulenleiter 40. Die Leiter 40 sind in derselben Ebene konzentrisch zueinander angeordnet. Jeder Leiter 40 besitzt zwei Anschlüsse 40, die sich von einer Seite der kombinierten magnetischen Schichten 30 aus erstrecken.

Auch die in Fig. 50 gezeigte Spule ist etwa quadratisch und liegt zwischen einem Paar magnetischer Schichten 30. Sie enthält mehrere Einzelwindungs-Spulenleiter 40, die in einer Ebene konzentrisch zueinander angeordnet sind. Jeder Leiter 40 besteht aus zwei Abschnitten, die symmetrisch zueinander ausgebildet sind. Jeder Abschnitt besitzt zwei Anschlüsse, die von den beiden entgegengesetzten Seiten der kombinierten Magnetschichten 30 abgehen. Damit besitzt jeder Einzelwindungs-Spulenleiter 40 vier Anschlüsse, von denen zwei auf einer Seite der kombinierten magnetischen Schichten 30 abgehen, während die verbleibenden zwei von der entgegengesetzten Seite der Magnetschichten 30 abgehen.

In den planaren magnetischen Elementen gemäß den Fig. 49 und 50 können die magnetischen Schichten 30 aus einem weichen Ferritkern, einem weichen Magnetband, einer magnetischen Dünnschicht oder dergleichen bestehen. Wenn Sie aus einem Band aus einer weichmagnetischen Legierung oder einer Schicht aus einer weichmagnetischen Legierung bestehen, ist es nötig, eine Isolierschicht in die Lücke zwischen der planaren Spule und jeder Magnetschicht 30 einzufügen.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung benötigen keine Durchkontaktierung oder Anschluß-Leiter, wie das magnetische Element, das spiralförmige planare Spulen besitzt. Deshalb lassen sie sich einfach herstellen. Weiterhin können sie leicht an externe Schaltungen angeschlossen werden, da die Anschlüsse jeder Einzelwindungs-Spule 40 sich von der Seite oder den Seiten der Magnetschichten 30 aus erstrecken.

Wenn irgendein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung als ein Induktivitätselement verwendet wird, so läßt sich dessen Induktivitätswert leicht dadurch einstellen, daß man die Einzelwindungs-Spulen 40 in verschiedener Weise miteinander verbindet, wie im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 51 bis 53 erläutert wird.

Fig. 51 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 gezeigten Typs. Sämtliche Einzelwindungs-Spulen 40 dieser planaren Spule sind mit ihren Enden verbunden, ausgenommen die am weitesten innen liegende Einzelwindungs-



Spule und die äußerste Spule. Das freie Ende der innersten Einzelwindungs-Spule 40 bildet einen Eingangsanschluß der planaren Spule, während das freie Ende der äußersten Einzelwindungs-Spule den anderen Anschluß der planaren Spule bildet. Die durch die so miteinander verschalteten Spulen 40 gebildete planare Spule erzeugt ein Magnetfeld, welches demjenigen ähnelt, das von einer planaren Spule mit einem mäanderförmigen Spulenleiter erzeugt wird.

Fig. 52 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 dargestellten Typs. Ein Ende jeder Einzelwindungs-Spule 40 ist mit demjenigen Ende der nächsten Spule 40 verbunden, das bezüglich der vertikalen Achse in Fig. 52 symmetrisch liegt. Das zweite Ende der innersten Einzelwindungs-Spule ist frei, ebenso wie das zweite Ende der äußersten Einzelwindungs-Spule. Bei dieser planaren Spule fließt der Strom in einer Richtung durch jede Einzelwindungs-Spule. Diese planare Spule erzeugt ein Magnetfeld, welches ähnlich dem Magnetfeld ist, das von einer planaren Spule erzeugt wird, die einen spiralförmigen Spulenleiter besitzt.

Fig. 53 zeigt eine planare Spule des in Fig. 49 gezeigten Typs.

Einige äußere Einzelwindungsspulen 40 dieser planaren Spule sind mit ihren Enden verbunden, ausgenommen die äußerste Einzelwindungsspule, während die übrigen Einzelwindungsspulen 40, das heißt die inneren Einzelwindungsspulen, mit ihren Enden an das Ende der nächsten Einzelwindungsspule 40 angeschlossen sind, das symmetrisch bezüglich der vertikalen Achse der Fig. 53 liegt. Diese planare Spule erzeugt ein Magnetfeld ähnlich demjenigen, das von einer planaren Spule erzeugt wird, bei der die Spule aus einem mäanderförmigen Abschnitt und einem spiralförmigen Abschnitt besteht.

Von den in den Fig. 51, 52 und 53 gezeigten planaren Spulen hat die Spule nach Fig. 52 die höchste Induktivität. Die planare Spule nach Fig. 51 besitzt den niedrigsten Induktivitätswert. Die planare Spule 53 hat einen Zwischen-Induktivitätswert.

Folglich kann jede planare Induktivität gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung ihren eigenen, leicht einstellbaren Induktivitätswert haben, wobei die Einstellung einfach durch Auswahl der Verbindung der Einzelwindungsspulen 40 erfolgt, wie es oben erläutert ist. Die Einzelwindungsspulen 40 können auch auf andere Weise als in den drei oben speziell erläuterten Verfahren gemäß den Fig. 51, 52 und 53 verbunden werden, so daß der Induktivitätswert der planaren Induktivität einen von dem Anwender der Induktivität gewünschten Wert aufweisen kann.

Fig. 54 ist ein Diagramm, welches den Induktivitätswert darstellt, den jede der Einzelwindungsspulen 40 des planaren magnetischen Elements nach Fig. 49 aufweist, wenn die Anschlüsse an eine Spannungsversorgung angeschlossen sind.

Wie aus Fig. 54 ersichtlich ist, besitzen die Einzelwindungsspulen 40 unterschiedliche Induktivitätswerte, wenn sie individuell an die gleiche Spannungsversorgung angeschlossen werden. Dies bedeutet, daß die planare Spule gemäß Fig. 49 geringfügig verschiedene Induktivitätswerte haben kann, wobei dies dadurch erreicht wird, daß sämtliche oder nur einige der Einzelwindungsspulen 40 in verschiedener Weise (einschließlich den oben anhand der Fig. 51 bis 53 erläuterten Weisen) verbunden werden, entweder einzeln oder in Kombination. In anderen Worten: der Induktivitätswert der planaren Spule (Fig. 49) kann in einem breiten Bereich genau getrimmt werden.

Das in Fig. 49 gezeigte planare magnetische Element kann in verschiedener Weise modifiziert werden, um als planarer Transformator zu fungieren, wie anhand der Fig. 55 bis 58 erläutert wird. Die Einzelwindungsspulen 40 des Elements werden in mindestens zwei Gruppen unterteilt, und die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen jeder Gruppe werden in verschiedener Weise verschaltet.

Fig. 55 und 56 zeigen Transformatoren mit einem Eingang und einem Ausgang. Fig. 57 zeigt einen Transformator mit einem Eingang und zwei Ausgängen. Bei jedem Transformator, bei dem die Einzelwindungsspulen 40 in zwei oder mehr Gruppen unterteilt sind, ist die Art und Weise der Verschaltung der Einzelwindungsspulen 40 nicht auf die Beispiele nach den Fig. 55 bis 57 beschränkt. Durch das Verbinden der Einzelwindungsspulen 40, die eine Primärspule bilden, derjenigen, die eine Sekundärspule bilden, sowie derjenigen, die eine Tertiärspule bilden, und so weiter, in verschiedener Weise läßt sich der Induktivitätswert der Spule oder der Kopplungskoeffizient zwischen den Spulen einstellen. Mithin läßt sich das Spannungsverhältnis und das Stromverhältnis des Transformators extern einstellen. Fig. 58 veranschaulicht die Beziehung zwischen den Spannungs- und Stromverhältnissen des in Fig. 49 gezeigten magnetischen Elements einerseits, und die Art der Verschaltung der Außenanschlüsse andererseits.

Das in Fig. 50 gezeigte planare magnetische Element kann zu einem Transformator modifiziert werden, dessen Spannungsverhältnis und Stromverhältnis noch genauer einstellbar ist als bei dem Transformator, der durch Modifizieren des planaren magnetischen Elements nach Fig. 49 gebildet wird, welcher weniger Ausgangsanschlüsse besitzt. Allerdings gilt: je mehr Ausgangsanschlüsse, desto schwieriger ist es für den Anwender, die Verschaltung korrekt durchzuführen. Deshalb ist es zu empfehlen, daß ein planares magnetisches Element mit zwei bis vier Ausgangsanschlüssen benutzt wird, wie es bei den Elementen nach den Fig. 51 und 55 der Fall ist.

Im Fall einer planaren Induktivität, deren elektrische Eigenschaften nicht extern eingestellt werden müssen, und die einen hohen Induktivitätswert besitzen muß, muß die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Einzelwindungsspulen so schmal sein, wie es die verfügbaren Herstellungsverfahren zulassen, und die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen müssen in der in Fig. 52 gezeigten Weise verschaltet werden, so daß die Induktivität einen hohen Induktivitätswert aufweisen kann. Im Fall eines planaren magnetischen Elements, welches unter Einbuße des Induktivitätswertes einen besonderen Frequenzgang besitzen muß, muß die Lücke zwischen jeweils zwei benachbarten Einzelwindungsspulen so breit sein, wie es der Herstellungsvorgang gestattet, während die Anschlüsse der Einzelwindungsspulen in der in Fig. 51 dargestellten Weise verschaltet sein müssen, damit diese Induktivität einen sehr guten Frequenzgang besitzt. Im Fall eines planaren Transformators, dessen elektrische Eigenschaften nicht von außen einstellbar sein müssen, muß die Lücke zwischen jeweils benachbarten Einzelwindungsspulen so schmal wie möglich sein, wodurch der Transformator sehr wirksam für spezielle Zwecke

arbeitet.

Um das planare magnetische Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung zu miniaturisieren, ist es wünschenswert, daß die Elemente durch dasselbe Dünnschichtverfahren hergestellt werden, wie es aus der Herstellung von Halbleiterbauelementen bekannt ist. Wenn diese Elemente auf einem aus Si oder GaAs bestehenden Halbleitersubstrat zusammen mit aktiven Elementen wie Transistoren und passiven Elementen wie Widerständen und Kondensatoren gebildet werden, läßt sich ein kleines monolithisches Bauelement fertigen. Die planaren magnetischen Elemente können in derselben Ebene liegen, wie die aktiven Elemente, sie können aber auch oberhalb oder unterhalb der aktiven Elemente angeordnet sein.

Fig. 59 ist eine Schnittansicht eines elektronischen Bauelements, welches ein Halbleitersubstrat 10, ein auf dem Substrat 10 gebildetes aktives Element 90 und ein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung aufweist, letzteres ist ebenfalls auf dem Substrat 10 gebildet. Fig. 60 ist eine Schnittansicht eines anderen Bauelements, welches ein Halbleitersubstrat 10, ein auf diesem gebildetes aktives Element 90, eine auf dem Substrat 10 ausgebildete Isolierschicht 20, eine auf der Isolierschicht 20 gebildete Verdrahtungsschicht 95, eine die Verdrahtungsschicht 95 abdeckende Isolierschicht 20 und zwei planare magnetische Elemente 1 gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung aufweist, ebenfalls auf der Isolierschicht 20 befindlich. Fig. 61 ist eine Schnittansicht eines elektrischen Bauelements, welches aufweist: ein Halbleitersubstrat 10, zwei planare magnetische Elemente 1 gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung auf dem Substrat 10, eine die planaren magnetischen Elemente abdeckende Isolierschicht und ein auf der Schicht 20 befindliches aktives Element 90. In diesen Bauelementen sind das Substrat 10, das aktive Element 90 und das magnetische Element oder die magnetischen Elemente 1 elektrisch über (nicht gezeigte) Kontaktlöcher verbunden.

Nicht nur die planaren magnetischen Elemente gemäß dem fünften Aspekt, sondern auch die planaren magnetischen Elemente gemäß jedem anderen Aspekt der Erfindung, können jeweils als Induktivitätselement oder als Transformator aus gebildet sein, jeweils beinhaltend mindestens eine planare Spule. Diese Elemente können ebenfalls auf diesem Halbleitersubstrat zusammen mit aktiven Elementen und passiven Elementen zur Bildung einer integrierten Schaltung ausge bildet sein.

Schließlich sollen im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 62A bis 64 die planaren magnetischen Elemente gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung beschrieben werden.

Fig. 62A und 62B sind eine Schnittansicht beziehungsweise eine teil weise geschnittene perspektivische Ansicht einer Einzelwindungsspule gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung. Wie Fig. 62A zeigt, enthält diese Einzelwindungsspule einen hohlen scheibenförmigen Leiter 42, einen in den Leiter 42 einge paßten ringförmigen hohlen Isolator 20 und ein in den Isolator 20 eingebettetes ringförmiges magnetisches Element 30.

Der hohle Leiter 42 besitzt überall einen großen Querschnitt. Damit kann ein starker Strom durch den Leiter 42 fließen, und das magnetische Element 30 magnetisieren. Wie aus den Fig. 62A und 62B hervorgeht, besitzt die Einzelwindungsspule einen vollständig abgeschirmten Kern, während das planare magnetische Element gemäß Fig. 17 einen teilweise freiliegenden Kern aufweist. Praktisch keine magnetischen Flüsse, die von dem magnetischen Element 30 erzeugt werden, gelangen aus der Einzelwindungsspule. Diese Einzelwindungsspule besitzt eine Stromaufnahmefähigkeit, die weit größer ist als jene, der planaren magnetischen Elemente nach den Fig. 17 und 18, obschon das Element nach Fig. 17 einen höheren Induktivitätswert bei Frequenzen unterhalb von 1 MHz aufweist und das Element nach Fig. 18 einen höheren Induktivitätswert bei Frequenzen von mehr als 1 MHz besitzt.

Die in den Fig. 62A und 62B dargestellte Einzelwindungsspule besitzt einen Induktivitätswert L, der sich folgendermaßen errechnet:

$$L = 2 \mu_s \cdot \delta_2 \ln(d_1/d_2) \times 10^{-7}$$

wobei  $\mu_s$  die spezifische Permeabilität des magnetischen Elements 30,  $d_1$  der Durchmesser des polähnlichen Abschnitts des Leiters 42,  $d_2$  der Außendurchmesser des scheibenförmigen Leiters 42 und  $\delta_2$  die Dicke des magnetischen Elements 30 ist.

Der Gleichstromwiderstand  $R_{DC}(\Omega)$  der Einzelwindungsspule beträgt:

$$R_{DC} = (K/I\delta_1) \ln(d_1/d_2)$$

wobei K der spezifische Widerstand des Leiters 42 ist.

Wenn der Leiter 42 aus Aluminium besteht, das eine zulässige Stromdichte von  $10^8 \text{ A/m}^2$  aufweist, errechnet sich der zulässige Strom ( $I_{max}$ ) der Einzelwindungsspule gemäß Fig. 62A und 62B folgendermaßen:

$$I_{max} = I \times 10^8 d_1 d_2 (\text{A})$$

Im Fall einer planaren Induktivität, die eine übliche spiralförmige planare Spule mit derselben Größe wie diese Einzelwindungsspule aufweist, ist der Querschnitt des Leiters der planaren Spule weit kleiner. Damit hat diese planare Induktivität eine zulässige Stromdichte  $I_{max}$  von lediglich einigen zehn Ampere.

Man kann mehrere der Einzelwindungsspulen des in Fig. 62A und 62B gezeigten Typs zur Bildung einer Spuleneinheit in Reihe schalten. Fig. 63A ist eine Schnittansicht einer solchen Spuleneinheit. Offensichtlich besitzt diese Spuleneinheit einen sehr hohen Induktivitätswert. Weiterhin lassen sich mehrere Spuleneinheiten des in Fig. 63A gezeigten Typs übereinander anordnen, wie dies in Fig. 63B gezeigt ist, um eine dickere Spuleneinheit zu erhalten, die einen noch höheren Induktivitätswert pro Flächeneinheit aufweist, als die in Fig. 63A gezeigte Spuleneinheit.

Die Einzelwindungsspule nach Fig. 62A und 62B läßt sich zu einem planaren Transformator des in Fig. 64

gezeigten Typs modifizieren. Der planare Transformator nach Fig. 64 ist dadurch gekennzeichnet, daß zwei hohle, scheibenförmige Leiter 42A und 42B, v. r. wendet als Primärspule beziehungsweise als Sekundärspule, ein magnetisches Element 30 umfassen, wobei ein Isolator 20A das magnetische Element 30 bedeckt und ein weiterer Isolator 20B zwischen den Leitern 42A und 42B liegt. Zwei Sätze von hohlen, scheibenförmigen Leitern können einen ersten Satz für eine Primärspule und einen zweiten Satz für eine Sekundärspule bilden. Die Anzahl von Leitern der ersten Gruppe und die Anzahl von Leitern der zweiten Gruppe bestimmt sich jeweils nach Maßgabe des gewünschten Windungsverhältnisses des Transformators.

Die planaren magnetischen Elemente gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung wurden im Detail beschrieben und erläutert. Erfindungsgemäß können die Elemente nach verschiedenen Aspekten der Erfindung, die jeweils bessere Kennwerte aufweisen als die herkömmlichen Elemente, in jeder beliebigen Kombination eingesetzt werden, so daß dadurch neue Arten und Typen von planaren Elementen geschaffen werden, die noch bessere Eigenschaften und Kennwerte sowie eine bessere Arbeitsleistung und Einsetzbarkeit aufweisen.

#### Auswahl der Materialien

Im folgenden sollen Materialien für die Komponenten der planaren magnetischen Elemente gemäß der Erfindung erläutert werden, das heißt für das Substrat 10, die Isolierelemente 20, die magnetischen Elemente 30 und den Leiter 42.

Der Spulenleiter 42 besteht aus einem Metall geringen Widerstands, wie zum Beispiel Aluminium (Al), einer Al-Legierung, Kupfer (Cu) einer Cu-Legierung, Gold (Au) oder einer Au-Legierung, Silber (Ag) oder Ag-Legierung. Die Materialien für den Leiter 42 sind selbstverständlich nicht auf die angegebenen Beispiele beschränkt. Der Nennstrom der aus dem Spulenleiter 42 gebildeten planaren Spule ist proportional zu der zulässigen Stromdichte des Materials niedrigen Widerstands des Leiters 42. Folglich ist es wünschenswert, daß das Material in hohem Maß widerstandsfähig gegenüber Elektronenwanderung, Spannungsverschiebung oder thermischer Verschiebung ist, die möglicherweise den Spulenleiter durchtrennt. Die magnetischen Elemente 30 bestehen aus einem aus vielen möglichen Materialien ausgewählten Material, wobei die Auswahl im Hinblick auf die Eigenschaften und Kennwerte der Induktivität oder des Transformators, der diese Elemente 30 beinhaltet, und auch im Hinblick auf die Frequenzbereiche, in denen die planare Induktivität oder der Transformator mit diesen Elementen 30 zu betreiben ist, erfolgt. Beispiele für Stoffe der Elemente 30 sind: Permalloy, Ferrit, Sendust, verschiedene amorphe magnetische Legierungen oder magnetischer Einkristall. Wenn die Induktivität oder der Transformator als Stromversorgungselement verwendet wird, sollten die Elemente 30 aus einem Material bestehen, welches eine hohe magnetische Sättigungsflußdichte besitzt.

Die magnetischen Elemente 30 können aus einem Verbundmaterial bestehen. Zum Beispiel kann es sich um ein Laminat aus einer FeCo-Schicht und einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht handeln, um eine künstliche Gitterschicht, um eine Mischphasenschicht aus FeCo-Phase und  $\text{B}_4\text{C}$ -Phase oder um eine Schicht mit dispergierten Teilchen. Werden die magnetischen Elemente auf dem Spulenleiter 42 gebildet, so müssen sie nicht notwendigerweise elektrisch isolierend sein. Wenn allerdings die magnetischen Elemente elektrisch leitend sind, muß zwischen ihnen einerseits und dem Spulenleiter 42 andererseits eine Isolierschicht angeordnet werden.

Um den Einfluß der Sättigung der magnetischen Elemente auszuschalten, ist es wünschenswert, daß die magnetischen Elemente mit ihren Achsen des schwer magnetisierbaren Feldes ausgerichtet sind mit den Magnetisierungsachsen der planaren Spule, und ein anisotropes Magnetfeld zu erzeugen, welches stärker ist als das durch den Spulenstrom erzeugte Magnetfeld. Die magnetischen Elemente sollten am besten aus Material mit hoher Sättigungsmagnetisierung bestehen, welches außerdem ein anisotropes Magnetfeld  $H_k$  mit einer geeigneten Stärke besitzt. Um weiterhin den aus der Mehrschichtstruktur resultierenden mechanischen Spannungseffekt zu minimieren, sollten die magnetischen Elemente vorzugsweise aus einem Material mit einer kleinen Magnetostriktion bestehen (zum Beispiel  $B_s < 10^{-6}$ ).

Das Kriterium für die Auswahl eines Materials für die magnetischen Elemente soll im folgenden unter Bezugnahme auf Fig. 65 erläutert werden, welche die Beziehung zwischen der Anzahl von Windungen der spiralförmigen planaren Spule einerseits und dem maximalen Spulenstrom und der Stärke (H) des durch den durch die Spule fließenden zulässigen Strom erzeugten Magnetfeldes andererseits veranschaulicht. Dieses Diagramm wurde durch Versuche erstellt, bei denen planare magnetische Elemente verschiedener Größe getestet wurden. Jedes dieser Elemente besitzt eine planare Spule mit einer unterschiedlichen Anzahl von Windungen, zwei magnetische Elemente mit unterschiedlicher Größe, und zwei Isolierschichten, von denen je eine zwischen der Spule und einer der magnetischen Schichten liegt. Die in diese Elemente eingebauten Spulen sind hinsichtlich des verwendeten Leiters und der zwischen den Windungen befindlichen Lücken identisch. Der Leiter besteht aus einer Al-Cu-Legierung mit einer Dicke von  $10 \mu\text{m}$  und einer zulässigen Stromdichte von  $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ . Die Lücke zwischen den Windungen beträgt  $3 \mu\text{m}$ . Die Isolierschichten besitzen eine Dicke von  $1 \mu\text{m}$ .

Das Magnetfeld, welches erzeugt wird, wenn der zulässige Strom in die Spule eingespeist wird, besitzt eine Stärke von etwa höchstens 20 bis 30 Oe. Wenn der maximale Spulenstrom auf 80% des zulässigen Stroms eingestellt ist, wird an die magnetischen Elemente ein Magnetfeld gelegt, dessen Intensität 16 bis 40 Oe im Höchstfall beträgt. In diesem Fall brauchen die magnetischen Elemente ein anisotropes Magnetfeld  $H_k$  mit einer Stärke von 16 bis 24 Oe.

Die Stärke des anisotropen Magnetfeldes hängt ab von den strukturellen Parametern des magnetischen Elements. Damit ist das anisotrope Magnetfeld nicht auf ein solches beschränkt, welches eine Stärke von 16 Oe bis 24 Oe besitzt. Grundsätzlich ist zu bevorzugen, daß dieses Magnetfeld eine Stärke von 5 Oe und mehr aufweist, um den Einfluß der Sättigung der magnetischen Elemente zu beseitigen.

Das Substrat 10 ist hinsichtlich der Materialauswahl nicht beschränkt, vorausgesetzt, daß mindestens diejenige

Fläche des Substrats 10, die ein magnetisches Element oder einen Leiter kontaktiert, elektrisch isolierend ist. Um jedoch die Bereitschaft für die Mikroverarbeitung zu fördern und die Herstellung eines Ein-Chip-Bauelements zu erleichtern, ist es wünschenswert, wenn das Substrat 10 aus einem Halbleiter besteht. Besteht das Substrat 10 aus einem Halbleiter, so muß seine Oberfläche isolierend gemacht werden, indem auf ihr eine Oxidschicht gebildet wird.

Die Isolierschichten 20 können aus einem anorganischen Stoff, wie zum Beispiel  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oder einem organischen Stoff wie zum Beispiel Polyimid bestehen. Um die zwischen den Schichten bestehende kapazitive Kopplung herabzusetzen, sollten die Schichten 20 besser aus einem Material bestehen, welches eine möglichst geringe Dielektrizitätskonstante besitzt. Die Schichten 20 müssen dick genug sein, um die magnetische Anisotropie jeder der Magnetschichten 30 unabhängig von der magnetischen Kopplung zwischen den magnetischen Schichten 30 aufrechtzuerhalten. Die optimale Dicke der Schicht 20 hängt ab von dem Material der magnetischen Schichten 30.

#### Beispiel 1

Ein magnetisches Element des in Fig. 6 dargestellten Typs wurde nach dem folgenden Verfahren hergestellt und hinsichtlich seiner Kennwerte getestet.

Die Oberfläche eines Siliciumsubstrats wurde thermisch oxidiert, um eine 1  $\mu\text{m}$  dicke erste  $\text{SiO}_2$ -Schicht zu erzeugen. Durch Zerstäubung wurde eine Sendust-Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Dann wurde ebenfalls durch Zerstäuben auf der Sendust-Schicht eine zweite  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  erzeugt.

Auf der zweiten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde durch Zerstäuben eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Al-Cu Legierungs-Schicht gebildet, die als Spulenleiter vorgesehen war. Es wurde eine vierte  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1,5  $\mu\text{m}$  als Atzmaske auf der Al-Cu-Legierungs-Schicht erzeugt. Die vierte  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde mit einem Positiv-Fotoresist überzogen. Es erfolgte ein Fotoätzen, um auf diese Weise das Fotoresistmaterial mit einem Muster zu versehen, entsprechend der Gestalt einer spiralförmigen Spule mit Windungen, die eine Abstandslücke von 3  $\mu\text{m}$  besaßen. Auf diese Struktur wurde  $\text{CF}_4$ -Gas gegeben, um ein reaktives Ionenätzen durchzuführen, wobei das Fotoresistmaterial als Maske diente. Die freiliegenden Bereiche der vierten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurden entfernt, so daß eine  $\text{SiO}_2$ -Maske in Form einer spiralförmigen Spule entstand. Als nächstes wurde  $\text{Cl}_2$ - und  $\text{BCl}_3$ -Gas auf die so erhaltene Struktur geleitet, um ein reaktives Magnetron-Niederdruck-Ionenätzen durchzuführen. Im Ergebnis wurden die freiliegenden Abschnitte der Al-Cu-Legierungs-Schicht fortgeätzt, wodurch ein spiralförmiger Spulenleiter entstand.

Gleichzeitig mit dem reaktiven Ionenätzen wurde eine vertikale anisotrope Ätzung auf der Al-Cu-Legierungs-Schicht erreicht. Dieses Ätzen war insofern erfolgreich, als das Ätzverhältnis der Al-Cu-Legierung 15 bezüglich der  $\text{SiO}_2$ -Maske der ersten, der zweiten und der dritten  $\text{SiO}_2$ -Schichten betrug.

Im Ergebnis erhielt man eine quadratische spiralförmige planare Spule mit einer Breite von 2 mm, mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$ , einer Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$  und einem Zwischenwindungs-Abstand von 3  $\mu\text{m}$ . Das Lücken-Geometrie-Verhältnis der spiralförmigen Spule betrug 3,3 ( $= 10 \mu\text{m}/3 \mu\text{m}$ ).

Dann wurde das Fotoresistmaterial sowie die  $\text{SiO}_2$ -Maske entfernt. Auf der Oberfläche der gesamten Struktur wurde durch vorgespanntes Zerstäuben eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet, um die Lücken zwischen den Windungen mit  $\text{SiO}_2$  auszufüllen. Es erfolgte ein Rückätzen, um dadurch die Oberseite dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht abzuflachen. Dann wurde auf dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine Sendust-Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet, und auf der Sendust-Schicht wurde eine Schutzschicht aus  $\text{Si}_3\text{N}_4$  erzeugt. Als Ergebnis war eine planare Induktivität fertiggestellt.

Die so hergestellte planare Induktivität wurde mittels einer Impedanzmessers getestet. Bei einer Frequenz von 2 MHz zeigte die Induktivität einen Widerstand (R) von 5,8  $\Omega$ , einen Induktionswert (L) von 3,78  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten (Q) von 8.

Weiterhin wurde die planare Induktivität in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V und eine Ausgangsspannung von 5 V bei einer Ausgangsleistung von 500 mW.

Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie arbeitete gut. Die geringen Leistungsverluste, die auf die planare Induktivität zurückzuführen waren, betrugen 58 mW und die auf die übrigen Elemente zurückzuführenden Leistungsverluste (das heißt die auf die Halbleiterelemente zurückzuführenden Verluste) betrugen 156 mW. Der Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers betrug 70% bei Nennlast.

Nach dem gleichen Verfahren, wie es oben erläutert ist, wurde eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich allerdings darin, daß ihr Al-Cu-Legierungs-Leiter eine Breite von 21  $\mu\text{m}$ , einen Zwischenwindungs-Abstand von 20  $\mu\text{m}$  und eine Dicke von 4  $\mu\text{m}$  besaß. Damit betrug das Lücken-Geometrie-Verhältnis der in die Vergleichsinduktivität eingebauten spiralförmigen Spule 0,2. Die Vergleichsinduktivität wurde mittels eines Impedanzmessers getestet. Bei einer Frequenz von 2 MHz ergab sich ein Widerstand (R) von 10,3  $\Omega$ , ein Induktivitätswert (L) von 3,7  $\mu\text{H}$  und ein Gütekoeffizient (Q) von 4,5. Die Vergleichsinduktivität wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler des oben beschriebenen Typs eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler wurde getestet, und es wurde heraus gefunden, daß der Leistungsverlust aufgrund der planaren Vergleichsinduktivität 103 mW betrug, während der Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers lediglich 65% betrug.

#### Beispiel 2

Mit dem gleichen Verfahren wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 1 wurde ein planarer Transforma-

tor mit zwei quadratischen spiralförmigen planaren Spulen und zwei magnetischen Schichten hergestellt. Die erste Spule besaß als Primärspule eine Breite von 2 mm, 20 Windungen und eine Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$ , eine Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$ , einen Windungsabstand von 3  $\mu\text{m}$  und ein Lücken-Geometrieverhältnis von 3,3. Die zweite, als Sekundärspule verwendete Spule war der ersten Spule identisch, mit der Ausnahme, daß sie 40 Windungen besaß. Die magnetischen Schichten hatten einen Abstand von 23  $\mu\text{m}$ .

Der planare Transformator wurde getestet mit Hilfe eines Impedanzmessers, um die elektrischen Kennwerte zu ermitteln. Es ergab sich eine Primärspulen-Induktivität von 3,8  $\mu\text{H}$ , eine sekundärseitige Induktivität von 14  $\mu\text{H}$ , eine Gegeninduktivität von 6,8  $\mu\text{H}$  und ein Kopplungskoeffizient von 0,93.

An die erste Spule des planaren Transformators wurde eine Sinusspannung von 500 kHz bei einem Effektivwert von 1 V angelegt. Dadurch erzeugte die Sekundärspule eine Sinusspannung mit einem Effektivwert von 1,7 V. Bei einer rein ohmschen Last von 200  $\Omega$  an dem planaren Transformator ergab sich eine Spannungsschwankung von etwa 10%.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, der mit einer Schaltfrequenz von 2 MHz arbeitete, und der Gleichstromwandler wurde geprüft. Er besaß eine Eingangsspannung von 3 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 100 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie der planare Transformator arbeitete. Als Ergebnis zeigte sich, daß der auf den Transformator zurückzuführende Leistungsverlust 88 mW bei der Nennlast des Gleichstromwandlers betrug.

Um die Leistungsfähigkeit des planaren Transformators zu ermitteln, wurde außerdem ein planarer Vergleichstransformator nach dem oben beschriebenen Verfahren hergestellt. Dieser enthielt zwei quadratische spiralförmige planare Spulen und zwei magnetische Schichten. Die erste Spule war als Primärspule 2 mm breit, hatte 20 Windungen und eine Leiterbreite von 37  $\mu\text{m}$  und eine Leiterdicke von 10  $\mu\text{m}$  bei einem Lückenabstand von 10  $\mu\text{m}$  und einem Lücken-Geometrieverhältnis von 1,0. Die zweite, als Sekundärspule verwendete Spule war identisch wie die erste Spule aufgebaut, sie hatte aber 40 Windungen. Die magnetischen Schichten hatten einen gegenseitigen Abstand von 23  $\mu\text{m}$ .

An die erste Spule des planaren Vergleichstransformators wurde eine Sinusspannung mit 500 kHz und einer effektiven Spannung von 1 V angelegt. Als Ergebnis erzeugte die zweite Spule eine Sinusspannung mit einem Effektivwert von 1,3 V. Die Spannung an der zweiten Spule ist kleiner als die bei dem erfindungsgemäßen planaren Transformator. Dies deshalb, weil der Spannungsabfall an der ersten Spule wegen des hohen Widerstands der ersten Spule beträchtlich war. Unvermeidlich ist die Verstärkung des Vergleichstransformators geringer als bei dem erfindungsgemäßen planaren Transformator.

Als an den planaren Vergleichstransformator eine rein ohmsche Last von 200  $\Omega$  angeschlossen wurde, wurden Spannungsschwankungen von etwa 18% beobachtet.

Der planare Vergleichstransformator wurde in einen Vorwärts-Gleichspannungswandler des oben beschriebenen Typs eingebaut. Der Gleichspannungswandler wurde getestet, um zu sehen, wie der Vergleichstransformator arbeitete. Das Testergebnis zeigte, daß der auf den Transformator zurückzuführende Leistungsverlust 152 mW bei der Nennlast des Gleichspannungswandlers betrug.

### Beispiel 3

Es wurde ein magnetisches Element des in Fig. 12A und 12B dargestellten Typs nach folgendem Verfahren hergestellt, und dessen Kennlinien wurden gemessen.

Auf einem Siliciumsubstrat wurde eine 1  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Isolierschicht erzeugt, die mit einer 5  $\mu\text{m}$  dicken Aluminiumschicht, deren spezifischer Widerstand  $2,9 \times 10^{-6} \Omega$  betrug, durch Zerstäuben aufgebracht wurde. Die Aluminiumschicht wurde durch Fotoätzung behandelt, um ein spiralförmiges Spulenmuster mit 200 Windungen auszubilden. Die Spule hatte einen Innendurchmesser von 1 mm und einen Außendurchmesser von 5 mm. Die Spule bestand aus 200 Windungen in Intervallen von 10  $\mu\text{m}$  mit einer jeweiligen Breite von 5  $\mu\text{m}$ . Demnach betrug das Leitungs-Geometrieverhältnis 1. Die spiralförmige planare Spule hatte einen Widerstand von 120  $\Omega$  und einen Induktivitätswert von 0,14 mH.

Die so ausgebildete planare Spule wurde in einen abwärts transformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler der 0,1 W-Klasse eingebaut, der bei einer Betriebsfrequenz von 300 kHz arbeitete. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um das Verhalten der planaren Spule herauszufinden. Diese fungierte als Induktivität innerhalb des Gleichstromwandlers.

Nach dem oben beschriebenen Verfahren wurde eine spiralförmige, planare Vergleichsspule hergestellt. Diese hatte den gleichen Innen- und Außendurchmesser wie die erfindungsgemäße Spule. Sie besaß 130 Windungen in Abständen von 15  $\mu\text{m}$ , jeweils mit einer Breite von 10  $\mu\text{m}$ . Demnach betrug das Leiter-Geometrieverhältnis 0,5. Die Vergleichsspule besaß einen Induktivitätswert von 0,05 mH.

### Beispiel 4

Es wurde die gleiche spiralförmige planare Spule wie im Beispiel 3 hergestellt, mit der Ausnahme, daß diese Spule einen Leiter aus einer amorphen Co-Si-B-Legierung mit einer Dicke von 2  $\mu\text{m}$  und zwei den Leiter einschließenden  $\text{SiO}_2$ -Schichten mit einer Dicke von 2  $\mu\text{m}$  besaß. Die planare Spule hatte eine Induktivität von 2 mH.

### Beispiel 5

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, bei dem zwei planare spiralförmige Spulen übereinander angeordnet werden. Die erste (untere) Spule diente als Primärspule und hatte die Parameter gemäß Beispiel 4.

Die zweite (obere) Spule diente als Sekundärspule und war etwa konzentrisch zu der ersten Spule angeordnet. Sie besaß 100 Windungen in Intervallen von 20 µm mit einer Dicke von 5 µm und einer Breite von 5 µm. Das Leiter-Geometrieverhältnis betrug 1. Der planare Transformator wurde getestet. Die Testergebnisse zeigten, daß das Spannungsverhältnis dieses Transformators 2 betrug, also genauso groß war wie das Verhältnis der Windungen der Primärspule zu den Windungen der Sekundärspule.

#### Beispiel 6

Es wurde ein dem Beispiel 3 ähnelndes planares magnetisches Element nach einem anderen Verfahren hergestellt. Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mit einer Dicke von 4 µm erzeugt. Dann wurde eine einkristalline Aluminiumschicht mit einer Dicke von 10 µm und einem spezifischen Widerstand von  $2,6 \times 10^{-6}$  cm durch MBE (Molekularstrahlepitaxie) auf der SiO<sub>2</sub>-Schicht erzeugt. Die Aluminiumschicht wurde unter Einsatz von Fotoresistmaterial geätzt und mit einem Muster einer spiralförmigen planaren Spule versehen, deren Innendurchmesser 1 mm und deren Außendurchmesser 5 mm betrug. Diese Spule hatte 200 Windungen, jeweils mit einer Breite von 5 µm und in Intervallen von 10 µm angeordnet. Damit besaß die Spule ein Leiter-Geometrieverhältnis von 2. Ihr Widerstand betrug 50 Ω, ihre Induktivität 0,14 mH.

Der Widerstand dieser Spule war niedriger als im Beispiel 3. Deshalb besaß die Spule einen zulässigen Strom, der größer war als im Beispiel 3. Deshalb eignete sich die Spule zum Einsatz in Hochleistungsgeräten.

#### Beispiel 7

Es wurde ein planares magnetisches Element mit dem gleichen Aufbau wie im Beispiel 3 hergestellt, jedoch nach einem anderen Verfahren. Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Auf letzterer wurde durch Dampfniederschlagung eine Al-Si-Cu-Legierungsschicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Auf dieser wiederum wurde mittels CVD-Verfahren eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht erzeugt. Auf dieser SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde ein Resistmaterialmuster gebildet. In einer Magnetron-RIE-Apparatur wurde die Al-Si-Cu-Legierungsschicht geschnitten, um eine mäanderförmige, quadratische Spule mit einem Durchmesser von 1 mm und einem Außendurchmesser von 4 mm zu erzeugen.

Außerdem wurde auf der mäanderförmigen, quadratischen Spule eine SiO<sub>2</sub>-Schicht mittels Plasma-CVD-Verfahren erzeugt, bei dem Monosilan (SiO<sub>4</sub>) und Stickoxid (N<sub>2</sub>O) als Materialien eingesetzt wurden. (Die Wachstumsgeschwindigkeit der SiO<sub>2</sub>-Schicht auf der Spule hing von der Zufuhrmenge dieser Materialien ab). Die SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde so geformt, daß die Lücken zwischen den Windungen der Spule durch diese Schicht überbrückt wurden, so daß erfolgreich Hohlräume entstanden aufgrund des schmalen Zwischenwindungs-Abstands von 1 µm und dem großen Leiter-Geometrieverhältnis von 2,5. Das sich ergebende planare Element besaß einen Induktivitätswert von 1,6 mH.

Wegen der so gebildeten Hohlräume war die Zwischenwindungs-Kapazität viel kleiner als im Vergleichselement, bei dem die Zwischenwindungs-Abstände mit SiO<sub>2</sub> gefüllt waren, und der Frequenzgang im hohen Frequenzbereich war wesentlich besser als beim Vergleichsbeispiel. Die Induktivität des planaren magnetischen Elements nahm nicht ab, bevor die Betriebsfrequenz auf 10 MHz angehoben wurde, während die Induktivität des Vergleichselements bei einer Betriebsfrequenz von 800 kHz scharf abnahm.

#### Beispiel 8

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung nach dem in Verbindung mit den Fig. 13A bis 13D erläuterten Verfahren hergestellt, welches Hohlräume zwischen den Windungen der spiralförmigen planaren Spule besaß.

Zunächst wurde auf einem Siliciumsubstrat durch thermische Oxidation eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet, auf der eine 1 µm dicke Aluminiumschicht erzeugt wurde. Diese Struktur wurde in der Atmosphäre stengelassen, wodurch die Aluminiumschicht oxidierte und sich eine etwa 30 Å dicke Oxidschicht bildete. Es wurden vier weitere Aluminiumschichten mit einer Dicke von jeweils 1 µm übereinander erzeugt. Jede dieser Aluminiumschichten, bis auf die oberste, hatte eine in der gleichen Weise wie die erste Aluminiumschicht oxidierte Oberfläche in Form einer etwa 30 Å dicken Oxidschicht. Als Ergebnis erhielt man eine leitende Schicht mit einer Dicke von 5 µm auf der SiO<sub>2</sub>-Schicht.

Anschließend wurde auf der leitenden Schicht durch Plasma-CVD eine Siliciumoxidschicht gebildet. Die sich ergebende Struktur wurde trocken geätzt, um eine quadratische, mäanderförmige Spule mit einer Breite von 5 mm zu erhalten. Die mäanderförmige Spule hatte 1000 Wiederholungsabschnitte, jeweils mit einer Breite von 2 µm und von der nächsten um 0,5 µm beabstandet. Dann wurde auf der mäanderförmigen Spule eine Siliciumoxidschicht gebildet, um die Hohlräume unter den Wiederholungsabschnitten auszubilden.

Auf demselben Siliciumsubstrat wurde ein aufwärtstransformierender Zerkhacker-Gleichstromwandler erzeugt, dessen Eingangsspannung 1,5 V, dessen Ausgangsspannung 3 V und dessen Ausgangsstrom 0,2 mA betragen, wobei der 10 mm lange, 5 mm breite und 0,5 mm dicke Ein-Chip-Gleichstromwandler in der Nähe der Mäanderspule lag. Die Betriebsfrequenz des Schaltelements in dem Gleichstromwandler betrug 5 MHz. Dieser Ein-Chip-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seines Leistungsvermögens getestet. Die Testergebnisse zeigten, daß der Gleichstromwandler voll funktionierte. Allerdings konnte er bei einer Frequenz von 500 kHz wegen fehlender Impedanz nicht gut arbeiten.

Der Ein-Chip-Gleichstromwandler war so dünn, daß ein kartenförmiger Pager (Rufanlage) erzeugt werden konnte, wie er bisher, wenn überhaupt, nur sehr schwierig herzustellen war. Fig. 66 zeigt schematisch einen kartenförmigen Pager mit einem Ein-Chip-Gleichstromwandler gemäß der Erfindung. Dieser Pager enthält

neben dem Ein-Chip-Gleichstromwandler 240 ein Substrat 200, eine Antenne 210, eine Betriebsschaltung 220 und eine Alarmeinrichtung 230 (zum Beispiel einen piezoelektrischen Summer). Die Komponenten 210, 220, 230 und 240 sind auf dem Substrat 200 montiert. Obschon in Fig. 66 nicht dargestellt, enthält der Pager eine Abdeckung zum Schutz der Komponentenzone 210, 220, 230 und 240.

#### Beispiel 9

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung von dem in Fig. 23 gezeigten Typ hergestellt und hinsichtlich seines Leistungsvermögens getestet. Das Element wurde folgendermaßen gefertigt:

Zunächst wurde an einer ersten Polyimidschicht eine Kupferfolie mit einer Dicke von 100  $\mu\text{m}$  haftend befestigt. Die Kupferfolie wurde durch chemisches Naßätzen mit einer spiralförmigen planaren Spule bemustert. Dann wurde auf der Spule eine zweite Polyimidschicht mit einer Dicke von 7 mm ausgebildet. Zwei jeweils 5 mm dicke Folien aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis wurden auf der ersten beziehungsweise der zweiten Polyimidschicht gebildet. Die beiden Polyimidschichten faßten mithin die Spule sandwichartig ein, wobei die Folien aus der amorphen Legierung auf Co-Basis die Spule und die Polyimidschichten zusammenfaßten, so daß eine planare Induktivität erhalten wurde. Die Spule hatte eine Breite  $a_0$  von 11 mm. Die Permeabilität der Folie aus der amorphen Co-Legierung wurde auf 4500 geschätzt, der Abstand  $\alpha$  betrug etwa 1 mm, wobei die Lücke zwischen den Windungen der Spule 114  $\mu\text{m}$  betrug. Die Co-Folien, die als magnetische Schichten verwendet wurden, besaßen eine Breite  $w$  von 11 mm ( $= a_0 + e \alpha$ ).

An die planare Induktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A angelegt und es wurde das magnetische Streufeld in der Nähe der Induktivität mit Hilfe eines hochempfindlichen Gaußmeters gemessen. Die Stärke des magnetischen Streufeldes war innerhalb der detektierbaren Grenzen des Gaußmeters gering.

Um zu bestimmen, ob die Stärke des so gemessenen magnetischen Streufeldes ausreichend gering war im Vergleich zu den Magnetfeldern, die bei herkömmlichen planaren Induktivitäten streuen, wurde eine Vergleichsinduktivität gemäß Beispiel 9 hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich darin, daß ihre magnetischen Schichten eine Breite  $w$  von 12 mm ( $= a_0 + \Omega$ ) besaßen. In die Vergleichsinduktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und das magnetische Leckfeld in der Nähe der Spule wurde mit demselben hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Das magnetische Streufeld hatte eine Intensität von etwa 30 Gauß.

#### Beispiel 10

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem dritten Aspekt der Erfindung hergestellt. Dieses Element ist von dem in Fig. 29 gezeigten Typ und stellt eine Kombination des Beispiels 9 und der Mittel gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung dar.

Zunächst wurde auf einem Halbleitersubstrat durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine 1  $\mu\text{m}$  dicke magnetische Schicht aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis erzeugt. Auf dieser Schicht wurde durch HF-Zerstäubung eine erste Isolierschicht eine  $\text{SiO}_2$ -Stärke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet. Auf der Isolierschicht wird durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Al-Cu-Legierungsschicht gebildet. Diese Struktur wurde einer reaktiven Magnetron-Ionenätzung unterzogen, um dadurch die Al-Cu-Legierungsschicht zu einer spiralförmigen planaren Spule auszubilden. Auf der Oberseite dieser Struktur wurde eine zweite Isolierschicht ( $\text{SiO}_2$ ) durch Vorspannungs-Zerstäubung gebildet, wodurch die Lücken zwischen den Spulenwindungen gefüllt und die gesamte Spule abgedeckt wurde. Die Oberfläche der zweiten Isolierschicht wurde bearbeitet und flach gemacht. Auf der zweiten Isolierschicht wurde durch HF-Magnetron-Zerstäubung eine magnetische Schicht aus einer amorphen Legierung auf Co-Basis mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet. Hierdurch entstand eine planare Induktivität.

Die Permeabilität der beiden amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis wurden mit einem Magnetometer vom Proben-Vibrationstyp gemessen. Die so gemessene Permeabilität betrug etwa 1000. Die spiralförmige planare Spule hatte eine Breite  $a_0$  von 4,5 mm mit einer Lücke zwischen den Spulenwindungen von 12  $\mu\text{m}$ . Aus der Zwischenwindungslücke wurde ein Abstand  $\alpha$  von 77  $\mu\text{m}$  abgeschätzt. Damit wurden amorphe magnetische Schichten auf Co-Basis mit einer Breite  $w$  von 5 mm ( $= a_0 + 6,5 \alpha$ ) hergestellt. In die planare Induktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und es wurde das magnetische Streufeld in der Nähe der planaren Induktivität mit dem hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Die Stärke des magnetischen Streufilters war gering und lag innerhalb der Meßgrenzen des Gaußmeters.

Um zu bestimmen, ob die Stärke des so gemessenen magnetischen Leckfeldes ausreichend gering war oder nicht, wurde nach dem Verfahren gemäß Beispiel 10 eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt. Die Vergleichsinduktivität unterschied sich von der erfindungsgemäßen Induktivität darin, daß ihre magnetischen Schichten eine Breite von  $w = 4,6 \text{ mm}$  ( $= a_0 + 1,3 \alpha$ ) besaßen. In die Vergleichsinduktivität wurde ein Gleichstrom von 0,1 A eingespeist, und in der Nähe der Induktivität wurde das magnetische Leckfeld mit dem hochempfindlichen Gaußmeter gemessen. Das magnetische Streufeld hatte eine hohe Stärke von etwa 50 Gauß.

#### Beispiel 11

Es wurden gemäß dem Verfahren nach Beispiel 9 planare Induktivitäten mit unterschiedlichen Werten  $w$  (das heißt unterschiedlichen Magnetschicht-Breiten) hergestellt. Diese Induktivitäten wurden hinsichtlich ihrer Induktivitätswerte getestet. Die planare Induktivität mit einem Wert  $w = 15 \text{ mm}$  zeigte einen Induktivitätswert von 90  $\mu\text{H}$ , etwa 1,3 mal so hoch wie bei der planaren Induktivität, deren Wert  $w = 12 \text{ mm}$  betrug. Diese Zunahme der Induktivität wurde auch bei der planaren Induktivität nach Beispiel 10 beobachtet.



## Beispiel 12

Unter Verwendung der planaren Induktivität nach Beispiel 9 wurde ein in Hybridschaltung ausgeführter abwärtstransformierender Zerkhacker-IC-Wandler mit Schaltelementen (Leistungs-MOSFETs), Gleichrichterdioden und einer Konstantspannungs-Steuerschaltung hergestellt. Die Schaltfrequenz des IC-Wandlers betrug 100 kHz. Eingangs- und Ausgangsspannungen betrugen 10 V beziehungsweise 5 V, die Ausgangsleistung betrug 2 W. Die planare Induktivität zeigte einen Induktivitätswert von 80  $\mu\text{H}$  und darüber und fungierte damit als ausgangssignalsteuernde Drosselspule. Beim Betrieb des IC-Wandlers arbeitete die planare Induktivität gut als Drosselspule. Es zeigte sich allenfalls eine nur geringe Verbindung bezüglich der Schaltwellenformen der MOSFETs. Die Welligkeit der Spannung bei den Ausgangs-Nennwerten (5 V; 0,5 A) hatte bei 10 mV einen Spitzenwert, war also alles andere als problematisch. Um das Leistungsvermögen der planaren Induktivität nach Beispiel 9 als Drosselspule mit einer Vergleichs-Induktivität zu vergleichen, wurde für den Vergleich die Induktivität gemäß Beispiel 4 hergenommen und in einen Gleichstromwandler desselben Typs eingebaut. Dieser IC-Wandler zeigte im Betrieb eine starke Kopplung zu der Schaltwellenform der MOSFETs. Dies möglicherweise deshalb, weil ein ziemlich starkes magnetisches Feld aus der planaren Vergleichs-Induktivität streute. Weiterhin besaß die Ausgangs-Welligkeit der Spannung bei den Nenn-Ausgangsgrößen (5 V; 0,5 A) einen Spitzenwert von 0,1 V, möglicherweise aufgrund der Tatsache, daß die Induktivität nicht 80  $\mu\text{H}$  besaß und mithin die Welligkeit nicht unter drücken konnte.

## Beispiel 13

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung hergestellt, ähnlich dem in Fig. 33 dargestellten Typ. Die Herstellung geschah folgendermaßen:

Zunächst wurde an einer 30  $\mu\text{m}$  dicken ersten Polyimidschicht eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie haftend angebracht und anschließend durch Naßätzen mit einem Muster entsprechend einer spiralförmigen Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einem Zwischenwindungs-Abstand von 100  $\mu\text{m}$  hergestellt. Auf der planaren Spule wurde eine zweite Polyimidschicht mit einer Dicke von 10 mm gebildet. Damit lag die Spule zwischen der ersten und der zweiten Polyimidschicht. Dann wurde diese Struktur zwischen einer ersten und einer zweiten amorphen Magnetschicht auf Co-Basis mit einer uniaxialen magnetischen Anisotropie eingefaßt. Diese magnetischen Schichten wurden hergestellt, indem amorphe magnetische Schichten auf Co-Basis unter Verwendung einer Einzelwalze rasch abgelöscht und anschließend diese Schichten in einem Magnetfeld ausgeglüht wurden. Jede magnetische Schicht besaß ein anisotropes Magnetfeld von 20 Oe, eine Permeabilität von 5000 entlang der Achse schwerer Magnetisierung, und eine magnetische Sättigungs-Flußdichte von 10 kG. Die aus der Spule, zwei Polyimidschichten und zwei magnetischen Schichten bestehende Struktur wurde zwischen einer dritten Polyimidschicht und einer vierten Polyimidschicht sandwichähnlich eingefaßt, von denen jede 5  $\mu\text{m}$  dick war. Diese Struktur wiederum wurde zwischen dritten und vierten amorphen magnetischen Filmen auf Co-Basis mit jeweils uniaxialer magnetischer Anisotropie und einer Dicke von 15  $\mu\text{m}$  eingefaßt, so daß eine 10 mm breite planare Induktivität erhalten wurde. Die erste und die zweite magnetische Schicht wurden mit ihren Achsen der leichten Magnetisierung ausgerichtet. Die dritte und die vierte magnetische Schicht wurden derart angeordnet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich mit denjenigen der ersten und der zweiten magnetischen Schicht schnitten.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der so erzeugten planaren Induktivität wurde ermittelt. Der Induktivitätswert der planaren Induktivität blieb unverändert bei 12,5  $\mu\text{H}$ , bis der Eingangsstrom auf 400 mA erhöht wurde. Dann begann die Induktivität bei dem Eingangsstrom von 500 mA und darüber abzusinken.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Zerkhacker-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangsspannung 12 V und dessen Ausgangsspannung 5 V betrug. Der Gleichstromwandler besaß eine Schaltfrequenz von 500 kHz und konnte einen Laststrom von bis zu 400 mA ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 2 W, sein Wirkungsgrad betrug 80%.

Wie im Beispiel 13 wurde eine Vergleichs-Induktivität 13a hergestellt, wobei im Unterschied zum Beispiel 13 die amorphen magnetischen Bänder auf Co-Basis nach dem Ablöschverfahren nicht weiter bearbeitet wurden. Es wurde eine weitere planare Vergleichs-Induktivität 13b gemäß Beispiel 13 hergestellt, mit der Ausnahme, daß die amorphen magnetischen Bänder auf Co-Basis geglüht wurden, jedoch nicht in einem Magnetfeld. Die magnetischen Lagen der Induktivität 13a besaßen eine Permeabilität von 2000, während diejenigen der Induktivität 13b eine Permeabilität von 10 000 besaßen.

Die magnetischen Lagen beider Vergleichs-Induktivitäten hatten eindeutige magnetische Anisotropie.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie von Beispiel 13 und den Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b wurde gemessen. Die Vergleichs-Induktivität 13b hatte einen höheren Induktivitätswert als Beispiel 13. Allerdings blieb ihr Induktivitätswert nur konstant, bis der Gleichstrom auf 200 mA zu nahm, um anschließend oberhalb von 250 mA abzufallen. Andererseits war der Induktivitätswert der Vergleichs-Induktivität 13a niedriger als Beispiel 13, und er nahm bei kleinem Gleichstrom nach und nach ab. Beide, die Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b waren schlechter als Beispiel 13 hinsichtlich des Frequenzgangs. Insbesondere nahm ihr Leistungsverlust bei einer Frequenz von 100 kHz und darüber abrupt zu. Bei einer Frequenz von 1 MHz betrugen ihre Gütekoeffizienten Q nur die Hälfte oder weniger als der Gütekoeffizient Q d s Beispiels 9.

Die Vergleichs-Induktivitäten 13a und 13b wurden als Ausgangs-Zerkhacker-Spule in Gleichstromwandlern desselben Typs verwendet. Diese Gleichstromwandler wurden getestet, um ihre maximale Ausgangsleistung und Wirkungsgrade zu testen. Ihre maximalen Lastströme waren auf etwa 200 mA begrenzt, unvermeidlich deshalb, weil die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Induktivitäten 13a und 13b entgegenstand. Damit betrug ihre maximale Ausgangsleistung nur etwa die Hälfte der Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der



Induktivität gemäß Beispiel 13, und der Wirkungsgrad betrug lediglich 70% von demjenigen des Gleichstromwandlers nach Beispiel 13.

#### Beispiel 14

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte, und der spiralförmigen Spule in der Induktivität gemäß Beispiel 13 ähnelte. Die Sekundärspule war letzterer identisch, mit der Ausnahme, daß sie zehn Windungen besaß. Die Sekundärspule wurde auf einer die Primärspule abdeckenden Isolierschicht ausgebildet. Die Induktivität der Primärspule dieses Transformators zeigte eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 13.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Weiterhin wurde die planare Induktivität gemäß Beispiel 13 als Ausgangs-Drosselspule in dem Vorwärts-Gleichstromwandler verwendet. Der Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seines Frequenzgangs getestet. Seine Schaltfrequenz betrug 500 kHz. Das Nenn-Ausgangssignal war ähnlich wie bei dem Gleichstromwandler, dessen Ausgangs-Drosselwelle die Induktivität gemäß Beispiel 13 bildete. Im Ergebnis trug der Transformator zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler bei.

Es wurden zwei planare Vergleichstransformatoren hergestellt. Der erste Vergleichstransformator war identisch dem Transformator nach Beispiel 14, mit der Ausnahme, daß die selben Magnetschichten wie bei jenen in der Induktivität des Vergleichsbeispiels 13a eingebaut wurden. Dieser zweite Vergleichstransformator war identisch dem Beispiel 14, mit der Ausnahme, daß die gleichen magnetischen Filme wie bei der Vergleichs-Induktivität 13b eingebaut wurden. Diese planaren Vergleichs-Transformatoren wurden getestet. Ihre Primärspulen-Induktivitätswerte waren ähnlich denjenigen der planaren Vergleichs-Induktivitäten 13a beziehungsweise 13b.

Diese planaren Vergleichs-Transformatoren wurden in Gleichstromwandlern des oben beschriebenen Typs eingebaut. Ihre Kennwerte wurden geprüft. Die Ergebnisse offenbarten, daß keiner der Gleichstromwandler eine normale Leistungsumwandlung vollziehen konnte, weil der planare Vergleichs-Transformator magnetisch gesättigt war.

#### Beispiel 15

Eine planare Induktivität des in Fig. 35 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung wurde folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine 1 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet wurde. Dann wurde auf dieser SiO<sub>2</sub>-Schicht in einem 100 Oe starken Magnetfeld mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur eine amorphe CoZrNb-Magnetschicht mit einer Dicke von 1 µm gebildet. Diese CoZrNb-Schicht besaß eine uniaxiale magnetische Anisotropie und besaß ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde auf der magnetischen Schicht durch Plasma-CVD oder HR-Zerstäubung eine 500 nm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Drei weitere CoZrNb-Schichten sowie drei weitere SiO<sub>2</sub>-Schichten wurden nach demselben Verfahren hergestellt, um eine Mehrschichtstruktur zu erhalten, die aus vier Magnetschichten und vier Isolierschichten bestand, die abwechselnd angeordnet waren. Die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht hatte eine Dicke von 1 µm. Jede der benachbarten beiden magnetischen Schichten war so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich rechtwinklig schnitten.

Dann wurde auf der obersten SiO<sub>2</sub>-Schicht eine 10 µm dicke Al-0,5%Cu-Schicht erzeugt, in einem Fall durch eine Gleichstrom Magnetron-Zerstäubungsapparatur, im anderen Fall durch eine Ultrahochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der Al-0,5%Cu-Schicht wurde eine 1,5 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht. Im Schleuderverfahren wurde auf diese SiO<sub>2</sub>-Schicht ein Positiv-Resistmaterial aufgebracht und durch Fotolithografie mit einem spiralförmigen Muster versehen. Mit Hilfe des spiralförmigen Fotoresistmusters als Maske wurde CF<sub>4</sub>-Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um so durch reaktives Ionenätzen die oberste SiO<sub>4</sub>-Schicht zu bearbeiten. Weiterhin wurden auf die Struktur Cl<sub>2</sub>-Gas sowie BCl<sub>3</sub>-Gas aufgebracht, um die Al-0,5%Cu-Schicht durch reaktives Ionenätzen zu bearbeiten. Letztere Schicht wurde dann geätzt, um eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen zu erhalten, wobei die Breite der Leiter 100 µm und der Lückenabstand zwischen den Windungen 5 µm betrug. Durch Schleuderguß wurde auf die Oberfläche dieser Struktur eine Polyamidsäurelösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, aufgebracht, um eine 15 µm dicke Schicht zu bilden und die Lücken zwischen den Windungen der Spule auszufüllen.

Diese Schicht wurde bei 350°C erhärtet, so daß sich eine Polyimidschicht bildete. Auf diese Struktur wurde CF<sub>4</sub>-Gas und O<sub>2</sub>-Gas geleitet, um durch reaktives Ionenätzen der Polyimidschicht deren Dicke auf 1 µm zu bringen, gemessen, von der Oberseite des Spulenleiters aus.

Anschließend wurden abwechselnd vier Isolierschichten und vier magnetische Schichten übereinander gebildet, wobei das oben erläuterte Verfahren verwendet wurde. Jeweils zwei benachbarte Magnetschichten wurden so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung sich unter einem rechten Winkel schnitten, ähnlich wie bei den Schichten unterhalb der spiralförmigen planaren Spule.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurde jede magnetische Schicht wiederholt erhitzt und abgekühlt, blieb jedoch wärmebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft blieb tatsächlich auch nach der Fertigstellung der Induktivität unverändert. In anderen Worten: die während der Produktion auf die Induktivität aufgetragene Wärme hatte nur einen extrem geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der magnetischen Schichten.

Die elektrischen Eigenschaften und Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert L von 2 µH und einen Gütekoeffizienten Q von 15 (bei 5 MHz).

Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie geprüft, und ihr Induktivitätswert blieb konstant, bis der Überlagerungs-Gleichstrom auf 150 mA erhöht wurde. Von dort an nahm bei einer Erhöhung des Überlagerungs-Gleichstroms auf 200 mA der Wert ab.

Diese planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Chopper-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Der Gleichstromwandler konnte einen Laststrom von bis zu 150 mA bei einer Schaltfrequenz von 4 MHz ausgeben. Die maximale Ausgangsleistung betrug 0,75 W, der Wirkungsgrad betrug 70%.

Es wurde eine weitere planare Induktivität gefertigt, die mit der oben beschriebenen Induktivität mit der Ausnahme identisch war, daß die die Lücken füllende Isolierschicht zwischen den Spulenwindungen nicht aus Polyimid, sondern aus SiO<sub>2</sub> bestand und entweder mittels CVD-Verfahren oder durch Vorspannungs-Zerstäuben hergestellt wurde. Diese planare Induktivität zeigte ähnliche elektrische Eigenschaften wie die oben beschriebene Induktivität.

Nach dem gleichen Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 15, wurde eine planare Vergleichsinduktivität hergestellt, mit dem Unterschied, daß die amorphen Magnetschichten aus CoZrNb nicht in einem magnetischen Feld gebildet wurden. Jeder der so hergestellten magnetischen Schichten zeigte eine Permeabilität von 10 000 und zeigte unzweideutig magnetische Anisotropie. Die Vergleichsinduktivität hatte einen Induktivitätswert, der etwa fünfmal höher war als bei der Induktivität nach Beispiel 15. Dieser Induktivitätswert war jedoch nur bis zu einem Gleichstromanstieg bis 10 mA konstant. Er nahm stark ab, wenn ein Strom von 20 mA oder mehr dem Eingangs-Gleichstrom überlagert wurde.

Die planare Vergleichsinduktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem Gleichstromwandler desselben Typs wie im Beispiel 15 eingebaut. Der Gleichstromwandler mit dieser Vergleichsinduktivität wurde getestet. Er besaß einen maximalen Laststrom von etwa 10 mA aufgrund der schlechten Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Vergleichsinduktivität. Diese maximale Ausgangsleistung betrug ein Zehntel oder weniger der maximalen Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 15.

#### Beispiel 16

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte und identisch der spiralförmigen planaren Spule der Induktivität nach Beispiel 15 war, während die Sekundärspule mit der Ausnahme identisch war, daß sie zehn Windungen besaß und auf einer Polyimid-Isolierschicht mit einer Dicke von 2 µm ausgebildet war und die Primärspule bedeckte. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Transformators ergab eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die etwa die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 15.

Der planare Transformator wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Weiterhin wurde die Induktivität nach Beispiel 15 als Ausgangs-Drosselspule in dem Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingesetzt. Der Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennlinien untersucht. Seine Ausgangs-Nennleistung war vergleichbar mit der des Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 15. Da sämtliche magnetischen Elemente des Wandlers planar waren, konnte der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler sehr klein und leichtgewichtig ausgeführt werden.

Ein planarer Vergleichstransformator wurde nach dem Verfahren des Beispiels 16 hergestellt, wobei lediglich die amorphen Magnetfilme aus CoZrNb nicht in magnetische Felder ausgebildet wurden. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses planaren Transformators war im wesentlichen der gleiche wie bei der Induktivität, die zu Vergleichszwecken mit der Induktivität nach Beispiel 15 hergestellt wurde. Der Vergleichstransformator wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler des oben beschriebenen Typs eingebaut. Als dieser Gleichstromwandler getestet wurde, floß ein exzessiver Spitzenstrom durch die Leistungsschalter-MOSFETs in den Wandler, und zwar aufgrund der Tatsache, daß der planare Vergleichstransformator magnetisch gesättigt war. Der Spitzenstrom brachte die MOSFETs zum Durchbruch.

#### Beispiel 17

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde auf einer 30 µm dicken ersten Polyimid-Schicht eine 100 µm dicke Kupferfolie haftend angebracht. Die Kupferfolie wurde durch Naßätzen mit einem Muster einer rechtwinkligen, spiralförmigen und planaren Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100 µm und einem Windungsabstand von 100 µm versehen. Eine zweite Polyimid-Schicht mit einer Dicke von 10 µm wurde auf der planaren Spule ausgebildet. Damit war die planare Spule sandwichartig zwischen der ersten und der zweiten Polyimid-Schicht eingefaßt.

Die resultierende Struktur wurde zwischen zwei rechtwinkligen Magnetschichten eingefaßt. Jede Magnetschicht war in Form von vier gleichschenkligen Dreiecken aus amorphen magnetischen Filmen auf Co-Basis mit einer Grundlinienlänge von 12 mm und einer Höhe von 6 mm ausgebildet. Jede dieser dreieckigen Magnetschichten war hergestellt worden, indem eine amorphe Magnetschicht auf Co-Basis nach dem Schnell-Ablöschverfahren unter Verwendung einer Einzelwalze gebildet wurde und diese amorphe magnetische Schicht in einem Magnetfeld von 200 Oe gegläut wurde, welche sich parallel zu der Grundlinie der dreieckförmigen Schicht erstreckte. Die magnetischen Schichten besaßen ein anisotropes Magnetfeld von 20 Oe, eine Koerzitivkraft von 0,01 Oe entlang der Achse schwerer Magnetisierung, eine Permeabilität von 5000 entlang der Achse der schweren Magnetisierung, und eine magnetische Sättigungsflußdichte von 10 kG. Die so hergestellte planare Induktivität hatte eine Breite von 12 mm.

Die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der planaren Induktivität wurde ermittelt. Der Induktivitätswert der Induktivität blieb unverändert bei 12,5  $\mu\text{H}$ , bis der Eingangsstrom auf 200 mA anstieg. Er begann abzunehmen, als der Eingangsstrom 250 mA oder mehr betrug.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Der Gleichstromwandler besaß eine Schaltfrequenz von 500 kHz und konnte einen Laststrom von bis zu 200 mA ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 1 W, sein Wirkungsgrad betrug 80%.

Nach dem Verfahren gemäß dem Beispiel 17 wurde eine planare Vergleichsinduktivität 17a hergestellt, die lediglich von dem Beispiel 17 insoweit abwich, als die amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis nach dem Abkühlen im Schmelzbad nicht weiterbearbeitet wurden. Es wurde eine weitere planare Induktivität 17b nach dem gleichen Verfahren wie im Beispiel 17 hergestellt, mit der Ausnahme, daß die amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis zwar wärmebehandelt (geglüht) wurden, nicht jedoch in einem Magnetfeld. Die magnetischen Schichten der Induktivität 17a hatten eine Permeabilität von 2000, während diejenigen der Induktivität 17b eine Permeabilität von 10 000 besaßen.

Die magnetischen Schichten keiner der Vergleichsinduktivitäten zeigten eindeutige magnetische Anisotropie. Es wurden die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinien des Beispiels 17 und der Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b gemessen. Die Vergleichsinduktivität 17b hatte einen höheren Induktivitätswert als das Beispiel 17. Allerdings blieb der Induktivitätswert nur bis zu einem Anstieg des Stroms auf 100 mA konstant, und fiel dann bei einem Gleichstrom von mehr als 120 mA stark ab. Andererseits war der Induktivitätswert der Vergleichsinduktivität 17a niedriger als beim Beispiel 17, er begann bei einem geringen Gleichstrom allmählich abzufallen. Beide Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b waren schlechter als das Beispiel 17 auch bezüglich des Frequenzgangs. Speziell nahmen ihre Leistungsverluste bei Frequenzen von 100 kHz und darüber abrupt zu. Bei der Frequenz von 1 MHz betrug ihr Gütekoeffizient Q nur halb soviel oder weniger wie der Gütekoeffizient Q des Beispiels 13.

Die Vergleichsinduktivitäten 17a und 17b wurden als Ausgangs-Drosselspule in Gleichstromwandlern desselben Typs verwendet. Die Gleichstromwandler wurden getestet, um ihre maximale Ausgangsleistung und ihren Wirkungsgrad zu ermitteln. Die maximalen Lastströme waren begrenzt auf etwa 100 mA, und zwar unvermeidlich deshalb, weil die Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinien der Induktivitäten 17a und 17b so schlecht war. Damit betrug die maximale Ausgangsleistung etwa die Hälfte der Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 17, und der Wirkungsgrad betrug lediglich 70% von dem Wirkungsgrad des Gleichstromwandlers nach Beispiel 17.

#### Beispiel 18

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen hatte, und identisch mit der spiralförmigen planaren Spule der Induktivität nach Beispiel 17 war. Die Sekundärspule war identisch ausgebildet, und nach dem gleichen Verfahren wie Beispiel 17 auf einer die Primärspule abdeckenden Isolierschicht hergestellt, mit der Ausnahme, daß die Sekundärwicklung zehn Windungen besaß. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Transformators entsprach einer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war, wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 17.

Der planare Transformator wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrug. Die planare Induktivität nach Beispiel 5 wurde als Ausgangs-Drosselspule in dem Gleichstromwandler eingesetzt. Der Vorwärts-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennwerte getestet. Beim Betrieb mit einer Schaltfrequenz von 500 kHz zeigte der Transformator eine Ausgangs-Nennleistung, die mit derjenigen des abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 17 vergleichbar war. Offensichtlich trägt der Transformator nach Beispiel 17 zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler bei.

Es wurde ein planarer Vergleichstransformator mit dem gleichen Aufbau wie Beispiel 17 hergestellt, mit der Ausnahme, daß seine magnetischen Schichten von dem Typ waren, wie sie in der Vergleichsinduktivität 17a eingebaut wurden. Es wurde ein weiterer planarer Vergleichstransformator hergestellt, dessen Aufbau mit der Struktur des Beispiels 17 identisch war, mit der Ausnahme, daß die magnetischen Schichten von dem in die Vergleichsinduktivität 17b eingebauten Typ waren. Die Induktivitätswerte der Primärspule beider Vergleichstransformatoren 18' waren im wesentlichen die gleichen wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 17. Die Vergleichstransformatoren 19' wurden eingebaut in Vorwärts-Gleichstromwandler desselben Typs, der den Transformator gemäß Beispiel 18 enthielt. Beim Test konnten diese Gleichstromwandler keine normale Leistungsumsetzung bewirken, weil die Komponenten der Transformatoren magnetisch gesättigt waren.

#### Beispiel 19

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung folgendermaßen hergestellt:

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht mit einer Dicke von 1  $\mu\text{m}$  gebildet wurde. Auf diese Schicht wurde ein Negativ-Fotoresistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht. Das Fotoresistmaterial wurde fotolithografisch behandelt, um zwei Öffnungen in dem Fotoresistmaterial auszubilden. Diese Öffnungen hatten die Form von Gleichschenkligen Dreiecken, die mit ihren Scheiteln einander berührten und jeweils eine Grundlinie von 5 mm und eine Höhe von 2,5 mm besaßen. Anschließend wurde eine 1  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  gebildet, die teilweise auf dem Fotoresistmaterial und teilweise auf den freiliegenden Bereichen der  $\text{SiO}_2$ -Schicht lag (letztere jeweils in der

Form des gleichschenkligen Dreiecks). Die magnetische Schicht wurde in einem Magnetfeld von 100 Oe mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur gebildet. Es ergab sich eine uniaxiale magnetische Anisotropie, und man erhielt ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde das Fotoresistmaterial mit einem Lösungsmittel gelöst und von der  $\text{SiO}_2$ -Schicht entfernt. Demzufolge wurde derjenige Abschnitt der magnetischen Schicht, der auf dem Fotoresistmaterial ausgebildet war, abgehoben, und es wurden zwei amorphe magnetische Schichten aus  $\text{CoZrNb}$  in Form gleichschenkliger Dreiecke auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht ausgebildet.

Anschließend wurde ein Fotoresistmaterial auf der Oberseite dieser Struktur im Schleuderverfahren aufgebracht. Dieses Fotoresistmaterial wurde fotolithografisch behandelt, um zwei Öffnungen zu bilden. Die Öffnungen hatten die Form gleichschenkliger Dreiecke, die sich mit ihren Scheiteln berührten und jeweils eine Grundlinie von 5 mm und eine Höhe von 2,5 mm aufwiesen. Ihre Orientierung war so, daß sich ihre Achsen unter rechtem Winkel zu den Achsen der bereits auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildeten amorphen magnetischen Schichten aus  $\text{CoZrNb}$  erstreckten. Danach wurde eine 1  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  teilweise auf dem Fotoresistmaterial und teilweise auf den freiliegenden Bereichen (jeweils in Form eines gleichschenkligen Dreiecks) der  $\text{SiO}_2$ -Schicht. Die magnetische Schicht wurde in einem Magnetfeld von 100 Oe mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur gebildet. Es zeigte sich eine uniaxiale magnetische Anisotropie sowie ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Danach wurde das Fotoresist-Material mit einem Lösungsmittel gelöst und von der  $\text{SiO}_2$ -Schicht entfernt. Die Folge war, daß derjenige Abschnitt der magnetischen Schicht, der auf dem Fotoresistmaterial lag, abgehoben wurde, während die zwei anderen amorphen magnetischen Schichten aus  $\text{CoZrNb}$ , jeweils in Form eines gleichschenkligen Dreiecks, auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht ausgebildet waren.

Im Ergebnis wurde auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine quadratische, amorphe magnetische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  ausgebildet, bestehend aus vier dreieckigen Magnetschichten, deren Seiten jeweils 5 mm lang waren. Jede der vier dreieckigen magnetischen Schichten besaß eine Achse der leichten Magnetisierung, die sich entlang ihrer Grundlinie erstreckte.

Weiterhin wurde eine 1,5  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht durch Plasma-CVD oder HF-Zerstäubung auf der magnetischen Schicht gebildet. Auf der obersten  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde eine 10  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht gebildet, und zwar wahlweise durch eine Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder eine Hochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht wurde eine 1,5  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Auf dieser Schicht wiederum wurde ein Positiv-Resistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht. Mittels Fotolithografie wurde das Fotoresistmaterial mit einem Muster einer quadratischen Spiralförmigkeit versehen, deren Seiten mit denjenigen der quadratischen, amorphen Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  ausgerichtet waren. Unter Verwendung des Fotoresistmaterials als Maske wurde  $\text{CF}_4$ -Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um durch reaktives Ionenätzen die oberste  $\text{SiO}_2$ -Schicht zu bearbeiten. Weiterhin wurden  $\text{Cl}_2$ -Gas und  $\text{BCl}_3$ -Gas auf die Struktur aufgebracht, um die  $\text{Al-0,5\%Cu}$ -Schicht mittels reaktivem Ionenätzen zu bearbeiten. Die letztgenannte Schicht wurde dabei so geätzt, daß eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen, einer Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einem Zwischenwindungsabstand von 5  $\mu\text{m}$  entstand. Eine Polyamid-Säure-Lösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, wurde im Schleuderverfahren auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um eine 15  $\mu\text{m}$  dicke Schicht zu bilden, in der die Lücken zwischen den Windungen der Spule ausgefüllt wurden. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet und bildete dann eine Polyimidschicht. Auf diese Struktur wurde  $\text{CF}_4$ -Gas sowie  $\text{O}_2$ -Gas aufgebracht, um die Polyimidschicht einem reaktiven Ionenätzen zu unterziehen bis zu einer Schichtdicke von 1  $\mu\text{m}$ , gemessen von der Oberseite des Spulenleiters.

Als nächstes wurde eine der ersten amorphen magnetischen Schicht identische Schicht aus  $\text{CoZrNb}$  auf der Polyimidschicht gebildet, und zwar mit dem oben erläuterten Verfahren. Es ergab sich eine planare Induktivität mit dem in Fig. 36 dargestellten Aufbau. Während der Herstellung der Induktivität wurde die untere magnetische Schicht erhitzt und abgekühlt, sie blieb jedoch hitzebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft hat sich praktisch nach der Herstellung der Induktivität nicht verändert. In anderen Worten: Während des Produktionsvorgangs auf die Induktivität aufgetragene Wärme hat allenfalls einen sehr geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der unteren magnetischen Schicht.

Die elektrischen Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert  $L$  von 2  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten  $Q$  von 15 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet. Ihr Induktivitätswert blieb konstant bis zu einem Überlagerungs-Gleichstrom von 80 mA, und fiel dann ab, wenn der Überlagerungs-Gleichstrom auf 100 mA erhöht wurde.

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 36 dargestellten Typs hergestellt, dessen Aufbau mit dem oben erläuterten Aufbau identisch war, mit der Ausnahme, daß die die Lücken ausfüllende Isolierschicht zwischen den Spulenwindungen nicht aus Polyimid sondern aus  $\text{SiO}_2$  bestand, wobei entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren angewandt wurde. Diese planare Induktivität zeigte elektrische Kennwerte ähnlich denjenigen der oben beschriebenen planaren Induktivität.

Die planare Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem abwärtstransformierenden Zerstärker-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betragen. Der Gleichstromwandler konnte einen Laststrom von bis zu 80 mA bei einer Schaltfrequenz von 4 MHz ausgeben. Seine maximale Ausgangsleistung betrug 0,4 W, sein Wirkungsgrad betrug 70%.

Nach dem gleichen Verfahren wie beim Beispiel 19 wurde eine planare Vergleichs-Induktivität hergestellt, lediglich mit dem Unterschied, daß die amorphen magnetischen Schichten  $\text{CoZrNb}$  nicht in einem magnetischen Feld ausgebildet wurden. Jede so ausgebildete magnetische Schicht zeigte eine Permeabilität von 10 000 und hatte eindeutig eine magnetische Anisotropie. Die Vergleichs-Induktivität hatte einen Induktivitätswert, der etwa fünfmal so hoch war wie derjenige der Induktivität nach Beispiel 15. Diese Induktivität jedoch blieb nur bis zu einem Gleichstrom von etwa 8 mA konstant. Sie begann abzufallen, wenn der Strom von 10 mA oder ein

höherer Strom dem Eingangs-Gleichstrom überlagert war.

Die planare Vergleichs-Induktivität wurde als Ausgangs-Drosselspule in einem Gleichstromwandler desselben Typs wie die Induktivität nach Beispiel 19 eingesetzt. Der die Vergleichs-Induktivität enthaltende Gleichstromwandler wurde getestet. Sein maximaler Laststrom betrug etwa 8 mA, was auf die schlechte Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie der Vergleichs-Induktivität zurückzuführen war. Unvermeidlich betrug die maximale Ausgangsleistung nur ein Zehntel und weniger der maximalen Ausgangsleistung des Gleichstromwandlers mit der Induktivität nach Beispiel 19.

#### Beispiel 20

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule 20 Windungen aufwies und identisch der spiralförmigen Spule der Induktivität nach Beispiel 19 war, während die Sekundärspule identisch ausgebildet war, mit der Ausnahme, daß sie zehn Windungen besaß und auf einer Polyimidschicht mit einer Dicke von 2 µm ausgebildet war und die Primärspule abdeckte. Die Induktivität der Primärspule dieses Transformators besaß eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie, die im wesentlichen die gleiche war wie bei der planaren Induktivität nach Beispiel 19.

Der planare Transformator wurde in einen Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler eingesetzt, dessen Eingangs- und Ausgangsspannung 12 V beziehungsweise 5 V betrug. Die planare Induktivität nach Beispiel 19 wurde außerdem als Ausgangs-Drosselspule in dem Gleichstromwandler eingesetzt. Der Vorwärts-Gleichstromwandler wurde bezüglich seiner Kennwerte getestet. Der Transformator zeigte eine Ausgangs-Nennleistung, die vergleichbar war mit derjenigen des Gleichstromwandlers mit der planaren Induktivität nach Beispiel 19. Offensichtlich trug der Transformator nach Beispiel 20 zu der Miniaturisierung der isolierten Gleichstromwandler bei.

Es wurde ein planarer Vergleichstransformator hergestellt, dessen Aufbau identisch dem Beispiel 20 war, mit der Ausnahme, daß seine magnetischen Schichten von dem Typ waren, der in die Induktivität eingesetzt war, die zum Vergleich mit dem Beispiel 19 hergestellt wurde. Der Induktivitätswert der Primärspule dieses Vergleichstransformators war im wesentlichen der gleiche wie der bei der planaren Induktivität nach Beispiel 19. Der Vergleichstransformator wurde in die Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler desselben Typs eingebaut, der auch den Transformator nach Beispiel 20 enthielt. Als dieser Zeilenrücklauf-Gleichstromwandler geprüft wurde, floß ein übermäßig starker Spitzenstrom durch die Leistungsschalter-MOSFETs, die in dem Wandler verwendet werden, und zwar deshalb, weil der planare Vergleichstransformator magnetisch gesättigt war. Der Spitzenstrom brachte die MOSFETs zum Durchbruch.

#### Beispiel 21

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 38 dargestellten Typs gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt.

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, wodurch eine 1 µm SiO<sub>2</sub>-Schicht entstand, auf der ein Positiv-Fotoresistmaterial im Schleuderverfahren aufgebracht wurde. Das Fotoresistmaterial wurde mit einem Muster versehen, welches mehreren rechtwinkligen konzentrischen Nuten entsprach. Unter Verwendung des mit einem Muster versehenen Fotoresistmaterials als Maske erfolgte ein reaktives Ionenätzen des SiO<sub>2</sub> durch Aufbringen von CF<sub>4</sub>-Gas. Hierdurch erhielt die SiO<sub>2</sub>-Schicht rechtwinklige konzentrische Nuten mit einer jeweiligen Breite von  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 0,5 \mu\text{m}$ . Die Lücke  $L$  zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten betrug 4 µm. Dann wurde das Fotoresistmaterial entfernt.

Als nächstes wurde auf der mit Nuten versehenen SiO<sub>2</sub>-Schicht mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur bei Drehung des Siliciumsubstrats eine 2 µm dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet. Diese magnetische Schicht wurde ohne magnetische Felder ausgebildet, und es erhielt die amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb keine Anisotropie außer der durch die Form bedingten Anisotropie. (Unter denselben Zerstäubungsbedingungen wurde auf der glatten SiO<sub>2</sub>-Schicht, die durch thermische Oxidation entstanden war und eine glatte Oberfläche besaß, eine amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet. In dem Teil der magnetischen Schicht, der sich im Drehmittelpunkt befand, ließ sich praktisch keine magnetische Anisotropie feststellen.) Da die magnetische Schicht auf der mit Nuten versehenen SiO<sub>2</sub>-Schicht ausgebildet wurde, hatte sie mehrere rechtwinklige konzentrische Vorsprünge auf ihrer Unterseite. Diese magnetische Schicht wurde als untere magnetische Schicht verwendet.

Anschließend wurde auf der magnetischen Schicht durch Plasma-CFV oder HF-Zerstäubung eine 500 nm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht. Auf der obersten SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde mittels einer Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder einer Hochvakuum-Aufdampfapparatur eine 10 µm dicke Al<sub>0,5</sub>%Cu-Schicht aufgebracht. Auf letzterer wurde eine 1,5 µm dicke SiO<sub>2</sub>-Schicht gebildet. Auf diese SiO<sub>2</sub>-Schicht wurde eine Positiv-Fotoresistmaterial-Schicht im Schleuderverfahren aufgebracht und durch Fotolithografie mit einem Muster versehen, um eine Spiralförmigkeit zu erhalten. Unter Verwendung des spiralförmigen Fotoresistmaterials als Maske wurde CF<sub>4</sub>-Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um durch reaktives Ionenätzen die oberste SiO<sub>2</sub>-Schicht zu bearbeiten. Weiter wurde auf die Struktur Cl<sub>2</sub>-Gas und BCl<sub>3</sub>-Gas aufgebracht, um die Al<sub>0,5</sub>%Cu-Schicht mittels reaktivem Ionenätzen zu behandeln. Letztgenannte Schicht wurde dadurch so geätzt, daß eine spiralförmige planare Spule mit 20 Windungen in einer Leiterbreite von 100 µm und einem Zwischenwindungs-Abstand von 5 µm entstand. Dann wurde auf diese Struktur eine Polyamidsäure-Lösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, im Schleuderverfahren auf die Oberfläche aufgebracht, wodurch eine 15 µm dicke Schicht entstand und die Lücken zwischen den Spulenwindungen ausgefüllt wurden. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet, so daß die Polyimidschicht entstand. Auf diese Struktur wurde CF<sub>4</sub>-Gas und O<sub>2</sub>-Gas aufgebracht,

um die Polyimidschicht durch reaktives Ionenätzen auf eine Dicke von 1  $\mu\text{m}$  zu reduzieren, gemessen von der Oberseite des Spulenleiters.

Auf der Polyimidschicht wurde mittels einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur eine 2,5  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb ausgebildet, dann wurde im Schleuderverfahren auf letztgenannte Schicht eine Schicht aus Positiv-Fotoresistmaterial aufgebracht, welches mit einem Muster aus mehreren rechtwinkligen konzentrischen Nuten versehen wurde. Unter Verwendung des mit dem Muster versehenen Fotoresistmaterials als Maske erfolgte ein reaktives Ionenätzen der magnetischen Schicht aus CoZrNb durch Aufbringen von  $\text{Cl}_2$ -Gas und  $\text{BCl}_3$ -Gas. Demzufolge erhielt die magnetische Schicht rechtwinklige, konzentrische Nuten mit jeweils einer Breite von  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 0,5 \mu\text{m}$ . Die Lücke  $L$  zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten betrug 4  $\mu\text{m}$ . Diese magnetische Schicht wurde als obere magnetische Schicht verwendet.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurde die untere magnetische Schicht wiederholt erwärmt und abgekühlt, sie blieb jedoch wärmebeständig. Ihre magnetischen Eigenschaften blieben praktisch unverändert nach der Herstellung der Induktivität erhalten. In anderen Worten: die während der Produktion der Induktivität aufgebrachte Wärme hatte allenfalls einen sehr geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der unteren magnetischen Schicht.

Die elektrischen Kennwerte der so hergestellten planaren Induktivität wurden ermittelt. Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert  $L$  von 0,8  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten  $Q$  von 7 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet, wobei sich zeigte, daß der Induktivitätswert bis zu einem Überlagerungs-Gleichstrom von 300 mA konstant blieb und dann abfiel, als der Überlagerungs-Gleichstrom auf 350 mA anstieg.

In der  $\text{SiO}_2$ -Schicht, auf der die untere magnetische Schicht ausgebildet war, und in der oberen magnetischen Schicht wurden konzentrische Nuten ausgebildet, und zwar nach einem anderen Verfahren als dem der Fotolithografie. Hier empfiehlt sich eine Mikro-Oberflächenbearbeitung (spanabhebende Bearbeitung), bei der Nuten in die  $\text{SiO}_2$ -Schicht und die obere magnetische Schicht geschnitten werden. Im Beispiel 21 werden konzentrische Nuten in lediglich einer Oberfläche der  $\text{SiO}_2$ -Schicht und in lediglich einer Oberfläche der oberen magnetischen Schicht ausgebildet. Stattdessen kann man auch beide Oberflächen bearbeiten.

Die magnetischen Schichten, nämlich sowohl die obere als auch die untere magnetische Schicht, können aus einem magnetischen Isolierstoff bestehen, wie beispielsweise einem Weichferrit. In diesem Fall kann jede magnetische Schicht direkt auf der planaren Spule angeordnet sein, während die Spule als Form zur Ausbildung einer Spiralnute in jeder der magnetischen Schichten dient.

Es wurde eine weitere planare Induktivität hergestellt, die den gleichen Aufbau besaß, wie er oben beschrieben wurde, mit der Ausnahme, daß die die Lücken zwischen den Spulenwindungen ausfüllende Isolierschicht nicht Polyimid, sondern  $\text{SiO}_2$  war. Hierzu wurde entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren angewendet. Diese planare Induktivität hatte ähnliche elektrische Eigenschaften wie die oben beschriebene planare Induktivität.

Nach demselben Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, wurde eine planare Vergleichs-Induktivität 21a hergestellt, die sich von der vorgenannten Induktivität nur dadurch unterschied, daß weder die untere  $\text{SiO}_2$ -Schicht, noch die obere CoZrNb-Schicht mit Nuten versehen wurde.

Außerdem wurde nach demselben Verfahren, wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, eine planare Vergleichs-Induktivität 21b hergestellt, wobei der Unterschied darin bestand, daß die untere  $\text{SiO}_2$ -Schicht und die obere CoZrNb-Schicht mit einem Muster versehen wurden, um auf diese Weise recht winklige konzentrische Nuten mit jeweils einer Breite  $\delta = 2 \mu\text{m}$  und einer Tiefe  $W = 1 \mu\text{m}$  zu bilden, wobei der Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten konzentrischen Nuten  $L = 20 \mu\text{m}$  betrug. Die Bemessungen der in der oberen magnetischen Schicht gebildeten Nuten erfüllen nicht die Ungleichung (5).

Wenngleich beide Vergleichs-Induktivitäten 21a und 21b einen Induktivitätswert besaßen, der achtmal so groß war wie bei der Induktivität nach Beispiel 21, so nahm der Induktivitätswert jedoch sehr rasch ab, sobald der überlagernde Gleichstrom eine Stärke von 10 mA oder mehr besaß.

#### Beispiel 22

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung, welches dem in Fig. 43 dargestellten Typ entspricht, nach folgendem Verfahren hergestellt: Zunächst wurde an einer 40  $\mu\text{m}$  dicken ersten Polyimidschicht eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Kupferfolie haftend angebracht, die dann durch chemisches Naßätzen mit einem Muster einer spiralförmigen planaren Spule versehen wurde. Diese Spule war rechtwinklig, hatte 20 Windungen, eine Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einen Abstand zwischen den Windungen von 100  $\mu\text{m}$ . Dann wurde auf der spiralförmigen planaren Spule eine 30  $\mu\text{m}$  dicke zweite Polyimidschicht gebildet. Auf der ersten und der zweiten Polyimidschicht wurden jeweils zwei 15  $\mu\text{m}$  dicke, amorphe Legierungsfolien auf Co-Basis aufgebracht. Im Ergebnis schlossen die erste und die zweite Polyimid schicht die Spule sandwichartig zwischen sich ein, und die Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis schlossen die Spule und die Polyimidschichten zusammen zwischen sich ein. Beide Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis besaßen eine Permeabilität von 5000 entlang ihrer Magnetisierungsachse und eine Sättigungsflußdichte von 10 kG. Sie wurden hergestellt nach dem Verfahren des raschen Ablöschens unter Verwendung einer Einzelwalze und durch Wärmebehandlung dieser Schichten in einem Magnetfeld. Jede der Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis hatte aufgrund der Wärmebehandlung eine uniaxiale magnetische Anisotropie, und es zeigte sich ein anisotropes Magnetfeld 20 Oe.

Dann wurde die aus der Spule, den beiden Polyimidschichten und den zwei Folien aus amorpher Legierung auf Co-Basis bestehende Struktur zwischen zwei weiteren Polyimidschichten mit einer jeweiligen Schichtdicke von

5  $\mu\text{m}$  sandwichartig eingeschlossen. Demzufolge ergab sich eine planare Induktivität mit einer Größe von 5 mm  $\times$  10 mm. Deren Induktivitätswert betrug 12,5  $\mu\text{H}$ . Der Induktivitätswert blieb konstant, bis der Gleichstrom auf 400 mA erhöht wurde, und er begann abzufallen, als der Gleichstrom auf 500 mA erhöht wurde.

## Beispiel 23

5

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule identisch der in der Induktivität nach Beispiel 22 enthaltenen Spule war, und dessen Sekundärspule mit dieser identisch war, mit der Ausnahme, daß sie 10 Windungen und nicht 20 Windungen besaß. Der Transformator war im Aufbau identisch zu der Induktivität nach Beispiel 22, mit der Ausnahme, daß die Sekundärspule vorhanden war. Der Transformator wurde getestet und zeigte eine ähnliche Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie wie die planare Induktivität nach Beispiel 22.

10

## Beispiel 24

Es wurde eine planare Induktivität des in Fig. 35 dargestellten Typs gemäß einem vierten Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt:

15

Zunächst wurde eine Hauptfläche eines Siliciumsubstrats thermisch oxidiert, um eine 1  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht zu bilden, auf der in einem Magnetfeld von 100 Oe mit Hilfe einer HF-Magnetron-Zerstäubungsapparatur anschließend eine 1  $\mu\text{m}$  dicke amorphe magnetische Schicht aus CoZrNb gebildet wurde. Diese Schicht zeigte eine uniaxiale magnetische Anisotropie und ein anisotropes Magnetfeld von 50 Oe. Als nächstes wurde mittels Plasma-CVD oder HF-Zerstäubung auf der magnetischen Schicht eine 500 Å dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Es wurden drei weitere CoZrNb-Schichten und drei weitere  $\text{SiO}_2$ -Schichten nach demselben Verfahren hergestellt, so daß eine Mehrschichtstruktur entstand, die aus vier magnetischen Schichten und vier Isolierschichten bestand, die alternierend übereinander angeordnet waren. Vier Magnetschichten waren so ausgebildet, daß ihre Achsen leichter Magnetisierung miteinander ausgerichtet waren.

20

25

Dann wurde auf der obersten  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Al-0,5%Cu-Schicht ausgebildet, entweder mittels einer Gleichstrom-Magnetron-Zerstäubungsapparatur oder einer Hochvakuum-Aufdampfapparatur. Auf der Al-0,5%Cu-Schicht wurde eine 1,5  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Im Schleuderverfahren wurde auf dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine Positiv-Fotoresistmaterial-Schicht aufgebracht und mittels Fotolithografie mit einem spiralförmigen Muster versehen. Unter Verwendung des spiralförmigen Fotoresistmaterials als Maske wurde  $\text{CF}_4$ -Gas auf die Oberfläche der Struktur aufgebracht, um die oberste  $\text{SiO}_2$ -Schicht durch reaktives Ionenätzen zu bearbeiten. Außerdem wurde auf die Struktur  $\text{Cl}_2$ -Gas und  $\text{BCl}_3$ -Gas aufgebracht, um die Al-0,5%Cu-Schicht einer reaktiven Ionenätzung auszusetzen. Letztgenannte Schicht wurde dabei unter Bildung zweier spiralförmiger planarer Spulen geätzt, welche in ihrer Hauptachse miteinander ausgerichtet waren, jeweils 20 Windungen, eine Leiterbreite von 100  $\mu\text{m}$  und einen Windungsabstand von 5  $\mu\text{m}$  besaßen.

30

35

Auf die Oberfläche dieser Struktur wurde im Schleuderverfahren eine Polyamidsäurelösung, die ein Vorläufer des Polyimids ist, aufgebracht, um eine 15  $\mu\text{m}$  dicke Schicht zu bilden, welche die Lücken zwischen den Windungen der Spule ausfüllt. Diese Schicht wurde bei 350°C ausgehärtet zu einer Polyimidschicht. Auf diese Struktur wurde  $\text{CF}_4$ -Gas und  $\text{O}_2$ -Gas aufgebracht, um die Polyimidschicht durch reaktives Ionenätzen auf eine Dicke von 1  $\mu\text{m}$  zu bringen, gemessen an der Oberseite des Spulenleiters.

40

Anschließend wurden übereinander vier Isolierschichten und vier magnetische Schichten nach dem oben beschriebenen Verfahren gebildet.

Während der Herstellung der planaren Induktivität wurden die vier magnetischen Schichten unterhalb der Spulen wiederholt erhitzt und abgekühlt, sie blieben jedoch wärmebeständig. Ihre magnetische Eigenschaft blieb nach der Herstellung der Induktivität praktisch unverändert. In anderen Worten: die während der Herstellung der Induktivität aufgebrachte Wärme hatte allenfalls einen extrem geringen Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften der magnetischen Filme unterhalb der Spulen. Die elektrischen Eigenschaften der so hergestellten Induktivität wurden ermittelt: Die Induktivität besaß einen Induktivitätswert L von 2  $\mu\text{H}$  und einen Gütekoeffizienten Q von 15 (bei 5 MHz). Die Induktivität wurde hinsichtlich ihrer Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie getestet, wobei ihr Induktivitätswert konstant blieb bis zu einer Zunahme des Überlagerungs-Gleichstroms auf 150 mA, wobei sich eine beginnende Abnahme des Induktivitätswerts zeigte, als der Überlagerungs-Gleichstrom auf 200 mA erhöht wurde.

45

50

Es wurde eine weitere planare Induktivität hergestellt, die der oben beschriebenen Induktivität mit der Ausnahme entsprach, daß die die Lücken zwischen den Windungsspulen ausfüllende Isolierschicht nicht aus Polyimid, sondern aus  $\text{SiO}_2$  (aus einem organischen Silan hergestellt) war, wozu entweder das CVD-Verfahren oder das Vorspannungs-Zerstäubungsverfahren eingesetzt wurde. Diese planare Induktivität zeigte elektrische Eigenschaften, die denjenigen der oben beschriebenen planaren Induktivität ähnelten.

55

## Beispiel 25

60

Es wurde ein planarer Transformator hergestellt, dessen Primärspule identisch der in der Induktivität nach Beispiel 24 eingebauten Spule war, und dessen Sekundärspule letzterer identisch war mit der Ausnahme, daß anstatt 20 Windungen 10 Windungen vorhanden waren. Der Transformator ist im Aufbau identisch mit der Induktivität nach Beispiel 22, ausgenommen die Sekundärspule, wobei jede Spule zwischen zwei jeweils 2  $\mu\text{m}$  dicken Polyimidschichten eingefäßt sind. Die Transformatoren wurden getestet und zeigten eine Überlagerungs-Gleichstrom-Kennlinie ähnlich derjenigen, der planaren Induktivität nach Beispiel 22.

65



## Beispiel 26

Die Induktivität nach Beispiel 22 wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 500 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie vermochte einen Laststrom bis zu 400 mA bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz auszugeben. Der maximale Ausgangsstrom betrug 2 W bei einem Wirkungsgrad von 80%.

## Beispiel 27

Der planare Transformator nach Beispiel 23 wurde in einen Vorwärts-Gleichstromwandler mit einer Eingangsspannung von 12 V und einer Ausgangsspannung von 5 V eingebaut. Weiterhin wurde die planare Induktivität nach Beispiel 22 als Ausgangs-Drosselspule in dem Vorwärts-Gleichstromwandler eingesetzt. Letzterer wurde hinsichtlich seiner Kennlinien getestet. Bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz erhielt man ein Nenn-Ausgangssignal ähnlich wie bei dem Gleichstromwandler nach Beispiel 26. Das Ergebnis lautet: Dieser Transformator dient zur Miniaturisierung isolierter Gleichstromwandler.

## Beispiel 28

Die Induktivität nach Beispiel 24 wurde in einen abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandler eingebaut und als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler besaß eine Eingangsspannung von 10 V, eine Ausgangsspannung von 5 V und eine Ausgangsleistung von 500 mW. Der Gleichstromwandler wurde getestet, um zu sehen, wie die planare Induktivität arbeitete. Sie vermochte einen Laststrom von bis zu 150 mA bei einer Schaltfrequenz von 500 kHz auszugeben. Der maximale Ausgangsstrom betrug 0,75 W bei einem Wirkungsgrad von 70%.

## Beispiel 29

Der planare Transformator nach Beispiel 25 wurde in einen Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler eingebaut, dessen Eingangs- und Ausgangsspannungen 12 V beziehungsweise 5 V betrugen. Außerdem wurde die planare Induktivität nach Beispiel 24 als Ausgangs-Drosselspule für den Vorwärts-Gleichstromwandler verwendet. Der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler wurde hinsichtlich seiner Kennlinien getestet. Sein Nenn-Ausgangssignal war ähnlich demjenigen, des abwärtstransformierenden Zehacker-Gleichstromwandlers nach Beispiel 28. Da sämtliche magnetischen Elemente planar ausgebildet waren, konnte der Zeilen-Rücklauf-Gleichstromwandler ausreichend klein und leichtgewichtig ausgebildet werden.

## Beispiel 30

Es wurde ein planares magnetisches Element gemäß dem fünften Aspekt der Erfindung nach folgendem Verfahren hergestellt, wobei das Element dem in Fig. 49 dargestellten Typ entsprach: Zunächst wurde an eine erste, 30 µm dicken Polyimidschicht eine 100 µm dicke Kupferfolie haftend angebracht, die dann durch Naßätzen mit Eisenchlorid als Ätzmittel mit einem rechtwinkligen spiralförmigen Spulenmuster versehen wurde, welches 30 konzentrische quadratische Windungen, eine Leiterbreite von 100 µm und einen Windungsabstand von 100 µm besaß. Auf der planaren Spule wurde eine 10 µm dicke zweite Polyimidschicht gebildet. Damit war die Spule sandwichartig zwischen der ersten und der zweiten Polyimidschicht einge faßt. Diese Struktur wurde zwischen zwei quadratischen, amorphen magnetischen Schichten auf Co-Basis mit jeweils einer Größe von 10 mm × 10 mm ohne magnetische Beanspruchung eingefafßt, um ein planares magnetisches Element zu erhalten.

a) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden in der in Fig. 52 dargestellten speziellen Weise verschaltet, um eine planare Induktivität ähnlich derjenigen mit einer spiralförmigen Spule zu erhalten. Diese planare Induktivität wurde mit einem LCR-Messer getestet. Sie hatte einen Induktivitätswert von 20 µH bei einer Frequenz von 500 kHz, und sie besaß einen Gütekoeffizienten Q von 10.

Diese planare Induktivität wurde in einen als Hybrid-IC ausgebildeten Gleichstromwandler mit einer Schaltfrequenz von 500 kHz eingebaut und wurde als Ausgangs-Drosselspule verwendet. Der Gleichstromwandler in Form des Hybrid-IC arbeitete gut. Folglich kann die planare Induktivität zur Miniaturisierung von Gleichstrom-Spannungsversorgungen beitragen.

Außerdem wurde die planare Induktivität in ein Filter eingebaut, um Hochfrequenzanteile aus den Gleichspannungs-Versorgungsleitungen zu beseitigen, die an die Leistungs-MOS-FETs in einem nicht linearen 10-MHz Leistungsverstärker angeschlossen waren. Dank des Einsatzes der planaren Induktivität war das Filter hinreichend klein.

b) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden nach dem in Fig. 51 dargestellten spezifischen Muster verschaltet, um eine planare Induktivität zu erhalten, die ähnlich der Induktivität mit einer mäanderförmigen Spule war. Die so hergestellte planare Induktivität wurde mit



einem LCR-Messer getestet. Es ergab sich ein Induktivitätswert von etwa 300  $\mu\text{H}$ . Außerdem ergab sich ein guter Frequenzgang, sogar bei mehreren 10 MHz.

Die planare Induktivität wurde in einem Tiefpaß-Filter eingesetzt, welches an den Ausgang eines nicht-linearen 20-MHz-Leistungsverstärkers angeschlossen war. Wegen der Verwendung der planaren Induktivität konnte das Tiefpaß-Filter wesentlich kleiner gestaltet werden als solche, die herkömmliche Hohlspulen aufweisen.

c) Die Enden der konzentrischen Windungen des planaren magnetischen Elements wurden in dem in Fig. 55 dargestellten speziellen Muster verschaltet, wodurch ein planarer Transformator entstand, der eine Primärspule und eine Sekundärspule enthielt. Die Primärspule hatte 7 Windungen, die Sekundärspule hingegen hatte 2 Windungen. Das Spannungsverhältnis des Transformators betrug etwa 0,25.

d) Der so hergestellte planare Transformator wurde dazu verwendet, die Ausgangsimpedanz eines 1-MHz-Leistungsverstärkers einzustellen auf den Widerstand der an den Verstärker angeschlossenen Last. Die Ausgangsimpedanz des Leistungsverstärkers betrug 200  $\Omega$ , der Widerstandswert der Last betrug 50  $\Omega$ . Die Enden der konzentrischen Windungen jeder Spule wurden auf verschiedene Weise verschaltet, bis die Ausgangsimpedanz in der besten Weise auf den Lastwiderstand eingestellt war. Die Ausgangsimpedanz des Leistungsverstärkers kann nicht so gut auf den Lastwiderstand eingestellt werden, wenn die herkömmlichen planaren Transformatoren verwendet werden.

### Beispiel 31

Es wurden planare magnetische Elemente des in Fig. 49 dargestellten Typs und planare magnetische Elemente des in Fig. 50 dargestellten Typs nachfolgenden Verfahren hergestellt:

Zunächst wurde mittels HF-Zerstäubung auf einem Siliciumsubstrat eine 3  $\mu\text{m}$  dicke Schicht aus einer  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{60}$ -Legierung gebildet. Auf dieser Legierungsschicht wurde durch HF-Zerstäubung eine 1  $\mu\text{m}$  dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet. Dann wurde auf dieser  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine 10  $\mu\text{m}$  dicke Schicht aus einer Al-Cu-Legierung erzeugt, auf der wiederum eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet und in bekannter Weise mit einem Muster versehen wurde. Unter Verwendung der mit einem Muster versehenen  $\text{SiO}_2$ -Schicht als Maske wurde die Schicht aus der Al-Cu-Legierung einer reaktiven Ionenätzung mittels eines Magnetrons unterzogen, wodurch die Al-Cu-Legierungsschicht unter Bildung von 10 Spulenwindungen geätzt wurde. Jede Windung hatte die gleiche Leiterbreite von 20  $\mu\text{m}$ . Die Lücke zwischen den Windungen betrug 5  $\mu\text{m}$ . Die Seiten der innersten Windungen waren 0,81 mm lang, während die Seiten der äußersten Windung 4,5 mm lang waren. Auf dieser Struktur wurde mittels Plasma-CVD eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht gebildet, um damit die Lücken zwischen den Windungen auszufüllen, und die die 10 Windungen aufweisende planare Spule abzudecken. Diese  $\text{SiO}_2$ -Schicht wurde einem Resistmaterial-Rückätzverfahren unterzogen, wodurch ihre Oberseite glatt und flach wurde. Dann wurde auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine 3  $\mu\text{m}$  dicke Legierungsschicht aus  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{60}$  gebildet.

a) Die Anschlüsse des planaren magnetischen Elements des in Fig. 49 gezeigten Typs wurden durch Bonddrähte mit einem Leiterraum verbunden und dann mit einem Vergußharz eingekapselt, um ein Gehäuse mit einer Reihe von Anschlußstiften (SIP-Gehäuse) zu erhalten, welches gemäß Fig. 67 20 Anschlußstifte enthielt. Dieses Bauelement wurde kombiniert mit einem Halbleiter-Relais, so daß seine Induktivität schrittweise dadurch geändert werden konnte, daß man ein externes elektronisches Bauelement betätigte. Damit konnte dieses magnetische planare Element besser als Einstellelement dienen als herkömmliche Elemente.

b) Die Anschlüsse des planaren magnetischen Elements des in Fig. 50 dargestellten Typs wurden mittels Bonddrähten mit einem Leiterraum verbunden und dann mit einem Kunstharz-Gehäuse eingekapselt, um ein DIP-Bauelement (ein Bauelement mit zwei Reihen von Anschlußstiften) zu erhalten, welches gemäß Fig. 68 40 Anschlußstifte enthielt. Das Bauelement wurde kombiniert mit einem Halbleiter-Relais, so daß sein Induktivitätswert schrittweise geändert werden konnte durch Betätigung eines externen elektronischen Bauelements. Damit konnte dieses magnetische planare Element besser als Einstellelement dienen.

c) Nach dem gleichen Verfahren wie bei dem SIP-Bauelement (a) wurde ein SIP-Bauelement des in Fig. 67 dargestellten Typs hergestellt, mit der Ausnahme, daß das Planarelement und der Leiterraum in einem Mn-Zn-Ferrit-Gehäuse eingekapselt war. Dieses SIP-Bauelement läßt sich in verschiedenen Einrichtungen einsetzen, zum Beispiel in einem aufwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler, einem abwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler, eine HF-Schaltung zur Verwendung in flachen Pagern und in einem Resonanz-Gleichstromwandler. Fig. 69 zeigt ein Beispiel für einen aufwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler. Fig. 70 zeigt ein Beispiel für einen abwärtstransformierenden Zerhacker-Gleichstromwandler. Fig. 71 zeigt ein Beispiel für eine HF-Schaltung. Fig. 72 zeigt ein Beispiel für einen Resonanz-Gleichstromwandler.

### Beispiel 32

Es wurde eine planare Induktivität mit einer Windung von dem in Fig. 62A dargestellten Typ hergestellt, welche ein Siliciumsubstrat, einen Aluminiumleiter und Isolierschichten aus Siliciumdioxid enthielt. Die Strukturparameter der eine Windung aufweisenden, planaren Induktivität gemäß Fig. 62B waren folgende:

$$\begin{aligned} d_1 &= 1 \times 10^{-3} \text{ (m)} \\ d_2 &= 5 \times 10^{-3} \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_1 &= 1 \times 10^{-6} \text{ (m)} \\ \delta_2 &= 1 \times 10^{-6} \text{ (m)} \\ \mu_s &= 10^4 \\ \rho &= 2,65 \times 10^{-8} \text{ (}\Omega\text{m)} \\ d_3 &= 14 \times 10^{-6} \text{ (m)}\end{aligned}$$

Die planare Induktivität besaß folgende elektrische Kennwerte:

$$\begin{aligned}L &= 32 \text{ (nH)} \\ R_{DC} &= 14 \text{ (m}\Omega\text{)} \\ I_{max} &= 630 \text{ (mA)} \\ Q_{1 \text{ MHz}} &= 15 \\ Q_{10 \text{ MHz}} &= 150\end{aligned}$$

Q ist der Gütekoefizient, bei dem es sich um das Verhältnis des Induktivitätswertes L (effektiv) zu dem Gleichstromwiderstand handelt. Je größer die Gütes Q, desto besser.

Die eine Windung aufweisende planare Induktivität wurde getestet, und es wurde festgestellt, daß praktisch keine magnetischen Flüsse aus der Induktivität austreten.

Es wurde eine Vergleichsinduktivität mit der in Fig. 73 dargestellten Struktur hergestellt. Wie aus Fig. 73 ersichtlich ist, besaß die Vergleichsinduktivität die gleiche Größe wie Beispiel 32, das heißt  $d_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ (m)}$ ;  $d_3 = 14 \times 10^{-6} \text{ (m)}$ , jedoch enthielt die Induktivität eine spiralförmige planare Spule mit 124 Windungen, und nicht eine Einzelwindungs-Spule. Unterhalb und oberhalb des Spulenleiters 42 befinden sich zwei magnetische Schichten 30.

Die Vergleichsinduktivität besaß folgende elektrische Eigenschaften:

$$\begin{aligned}L &= 900 \text{ (}\mu\text{H)} \\ R_{DC} &= 600 \text{ (}\Omega\text{)} \\ I_{max} &= 6,40 \text{ (mA)} \\ Q_{1 \text{ MHz}} &= 9 \\ Q_{10 \text{ MHz}} &= 90\end{aligned}$$

Offensichtlich besitzt die planare Einzelwindungs-Induktivität nach Beispiel 32 eine große Stromkapazität und eignet sich zur Verwendung in einer starken Spannungsversorgung. Obschon ihr Induktivitätswert relativ gering ist, ist ihre Impedanz bei hohen Betriebsfrequenzen groß genug.

#### Patentansprüche

1. Planares magnetisches Element umfassend:

ein Substrat (10);

eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;

eine erste Isolierschicht (20B), die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;

eine planare Spule (40), die aus einem Leiter mit mehreren Windungen besteht und über der ersten Isolierschicht angeordnet ist, sowie ein Lücken-Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist, bei dem es sich um das Verhältnis der Dicke des Leiters zu der Lücke oder dem Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen handelt;

eine zweite Isolierschicht (20C), die über der planaren Spule angeordnet ist; und

eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.

2. Element nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch ein aktives Element (90) oder ein passives Element, welches auf dem Substrat ausgebildet ist.

3. Element nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken zwischen den Windungen mit einem Isoliermaterial gefüllt sind.

4. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken leer bleiben.

5. Element nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch eine Verbindungsschicht, die zwischen dem Substrat und dem Leiter liegt.

6. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, wobei diese Einheit sandwichartig eingeschlossen ist zwischen der ersten Isolierschicht und der zweiten magnetischen Schicht.

7. Element nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine Primärspule und eine Sekundärspule über der magnetischen Primärschicht bildet.

8. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine spiralförmige Spule ist, die folgender Beziehung genügt:

$$w \geq a_0 + 2 \alpha$$

wobei w die Breite der ersten und der zweiten magnetischen Schicht,  $a_0$  die Breite der planaren Spule,  $\alpha = (\mu_s \times g \times t/2)^{1/2}$  mit  $\mu_s$  als der Permeabilität der magnetischen Elemente, t der Dicke der ersten und der zweiten magnetischen Schicht und g dem Abstand zwischen der ersten und der zweiten magnetischen Schicht ist.

9. Element nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule aus zwei Spulenelementen besteht und weiterhin eine dritte Isolierschicht aufweist, die zwischen den Spulenelementen liegt und ein Durchkontaktierungsloch sowie einen in dem Durchkontaktierungsloch befindlichen Leiter besitzt, welcher die Spulenelemente miteinander verbindet.
10. Element nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule ein Magnetfeld erzeugt, und daß die erste und die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufweisen, deren Achse sich rechtwinklig zu der Achse des Magnetfelds erstreckt.
11. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht jeweils vier dreieckige magnetische Elemente aufweist, die so angeordnet sind, daß ihre Scheitel einander berühren, wobei jedes dreieckige magnetische Element eine uniaxiale Anisotropie besitzt, deren Achse sich parallel zu der Grundlinie erstreckt.
12. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht in einer Oberfläche streifenförmige Nuten und Vorsprünge aufweisen, die sich parallel zu dem Leiter erstrecken.
13. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine rechtwinklige spiralförmige Spule ist, und mit einer Hauptachse ausgerichtet ist, mit Achsen leichter Magnetisierung der ersten und der zweiten magnetischen Schicht.
14. Element nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.
15. Element nach Anspruch 13, gekennzeichnet durch eine Einrichtung zum Abschirmen von magnetischen Flüssen, die aus der planaren Spule herausstreuen.
16. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule mehrere rechtwinklige spiralförmige Spulen enthält und die erste sowie die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie und Achsen leichter Magnetisierung besitzen, die mit den Hauptachsen der rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen ausgerichtet sind.
17. Element nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.
18. Element nach Anspruch 16, gekennzeichnet durch Mittel zum Abschirmen von magnetischen Flüssen, die aus der planaren Spule herausstreuen.
19. Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Planarspule mehrere Außenanschlüsse besitzt, und aus mehreren planaren Einzelwindungsspulen besteht, die mit verschiedenen Außendurchmessern auf der ersten Isolierschicht ausgebildet sind.
20. Element nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule ein Leiter-Geometrieverhältnis von mindestens 1 besitzt, bei dem es sich um das Verhältnis der Breite des Leiters zu dessen Dicke handelt.
21. Planares magnetisches Element umfassend:  
ein Substrat (10);  
eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;  
eine erste Isolierschicht (20B), die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;  
eine aus einem Leiter gebildete planare Spule (40) mit mehreren Windungen, die über der ersten Isolierschicht angeordnet und ein Leiter-Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist, wobei das Leiter-Geometrieverhältnis das Verhältnis der Leiterdicke zu der Leiterbreite ist;  
eine zweite Isolierschicht (20C), die über der planaren Spule angeordnet ist; und  
eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.
22. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat ein Halbleiter ist.
23. Element nach Anspruch 21 und 22, gekennzeichnet durch ein aktives Element (90) oder ein passives Element auf dem Substrat.
24. Element nach einem der Ansprüche 21 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken zwischen den Leitern mit Isoliermaterial gefüllt sind.
25. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Lücken frei bleiben.
26. Element nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen jeweils zwei benachbarten Windungen der Planarspule ein Hohlraum gebildet ist, welcher mindestens ein Drittel der Querschnittsfläche der Lücke belegt.
27. Element nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch eine Verbindungsschicht zwischen Substrat und Leiter.
28. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, die sandwichartig zwischen der ersten Isolierschicht und der zweiten magnetischen Schicht eingeschlossen ist.
29. Element nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine Primärspule und eine Sekundärspule bildet.
30. Planares magnetisches Element, gekennzeichnet durch:  
ein Substrat (10);  
eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;  
eine erste Isolierschicht (20B) über der ersten magnetischen Schicht;  
eine aus einem Leiter (42) gebildete planare Spule (40) mit mehreren Windungen, die über der ersten Isolierschicht angeordnet ist und ein Lücken-Geometrieverhältnis von mindestens 1 aufweist, wobei das Lücken-Geometrieverhältnis das Verhältnis der Dicke des Leiters zu dem Abstand zwischen benachbarten Windungen ist;

eine zweite Isolierschicht (20C) die über der planaren Spule angeordnet ist; und  
 eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist,  
 wobei die planare Spule ein Magnetfeld erzeugt und die erste und die zweite magnetische Schicht eine  
 uniaxiale magnetische Anisotropie besitzen, die sich rechtwinklig zur Achse des Magnetfelds erstreckt.

31. Element nach Anspruch 30, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

32. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß jede Isolierschicht aus mehreren Isolier-Teil-  
 schichten besteht und jede magnetische Schicht aus mehreren magnetischen Teilschichten besteht, die  
 zwischen den Isolier-Teilschichten liegen und derart angeordnet sind, daß jeweils zwei benachbarte Teil-  
 schichten mit ihren Achsen leichter Magnetisierung einander rechtwinklig kreuzen.

33. Element nach Anspruch 32, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

34. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht  
 jeweils vier dreieckige magnetische Elemente enthalten, die einander mit den Scheitel berühren, wobei  
 jedes dreieckige magnetische Element eine uniaxiale magnetische Anisotropie besitzt, deren Achse sich  
 parallel zu der Grundlinie erstreckt.

35. Element nach Anspruch 34, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

36. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die erste und die zweite magnetische Schicht  
 auf einer Oberfläche streifenförmige Nuten und Vorsprünge aufweisen, die sich parallel zu den Leitern  
 erstrecken.

37. Element nach Anspruch 36, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

38. Element nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule eine rechtwinklige spiralför-  
 mige Spule ist und die erste und die zweite magnetische Schicht eine uniaxiale magnetische Anisotropie  
 aufweisen und mit ihrer Achse leichter Magnetisierung ausgerichtet sind, mit den Hauptachsen der recht-  
 winkligen spiralförmigen Spulen.

39. Element nach Anspruch 38, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat ausgebildetes aktives Element  
 (90) oder passives Element.

40. Element nach Anspruch 38, gekennzeichnet durch Mittel zum Abschirmen magnetischer Leckflüsse von  
 der planaren Spule.

41. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß beide Enden der planaren Spule von der ersten  
 und der zweiten magnetischen Schicht abstehen.

42. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule aus mehreren rechtwinkligen  
 spiralförmigen Spulen besteht, die mit ihren Hauptachsen zueinander ausgerichtet sind.

43. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule und die zweite Isolierschicht  
 miteinander in Berührung stehen und eine Einheit bilden, die sandwichartig zwischen der ersten Isolier-  
 schicht und der zweiten magnetischen Schicht eingeschlossen ist.

44. Element nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die planare Spule zwei rechtwinklige spiralför-  
 mige Spulen aufweist, die mit ihren Hauptachsen ausgerichtet sind, und daß die zweiten magnetischen  
 Schichten auf den rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen angeordnet sind, wobei die Achsen leichter Ma-  
 gnetisierung mit den Hauptachsen der rechtwinkligen, spiralförmigen Spulen ausgerichtet sind.

45. Planares magnetisches Element, umfassend:

ein Substrat (10);

eine erste magnetische Schicht (30A), die über dem Substrat angeordnet ist;

eine erste Isolierschicht (20B) die über der ersten magnetischen Schicht angeordnet ist;

eine über der ersten Isolierschicht angeordnete planare Spule (40), die mehrere Außenanschlüsse sowie  
 mehrere planare Einzelwindungsspulen aufweist, die in der selben Ebene angeordnet sind;

eine zweite Isolierschicht (20C) die über der planaren Spule angeordnet ist; und

eine zweite magnetische Schicht (30B), die über der zweiten Isolierschicht angeordnet ist.

46. Planares magnetisches Element, umfassend:

ein Substrat (10);

einen hohlen zylindrischen Leiter (40) der auf dem Substrat angeordnet ist;

einen nach Art einer Toruswicklung ausgebildetes magnetisches Element (30) das den hohlen zylindrischen  
 Leiter umgibt;

eine Isolierschicht (20), die auf dem Außenumfang des torusähnlich ausgebildeten magnetischen Elements  
 gebildet ist; und

eine leitende Schicht (40), welche die Isolierschicht, und die Enden des torusförmigen magnetischen Ele-  
 ments abdeckt und an das obere oder untere Ende des hohlen zylindrischen Leiters angeschlossen ist.

47. Element nach Anspruch 46, gekennzeichnet durch eine zweite leitende Schicht (42B), welche die Isolier-  
 schicht bedeckt, und eine zweite Isolierschicht (20B), welche die zweite leitende Schicht bedeckt.

48. Element nach Anspruch 46, gekennzeichnet durch ein auf dem Substrat gebildetes aktives Element (90)  
 oder passives Element.

49. Planares magnetisches Bauelement, gekennzeichnet durch

ein hohles zylindrisches magnetisches Element; und

mehrere planare magnetische Elemente des Typs nach Anspruch 46, die in radialer Richtung des hohlen  
 zylindrischen magnetischen Elements in Reihe geschaltet sind.

50. Planares magnetisches Bauelement, gekennzeichnet durch

eine hohles zylindrisches magnetisches Element; und  
mehrere planare magnetisch Elemente des Typs nach Anspruch 49, die in axialer Richtung des hohlen  
zylindrischen magnetischen Elements übereinander gelegt sind.

Hierzu 58 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

— Leerseite —

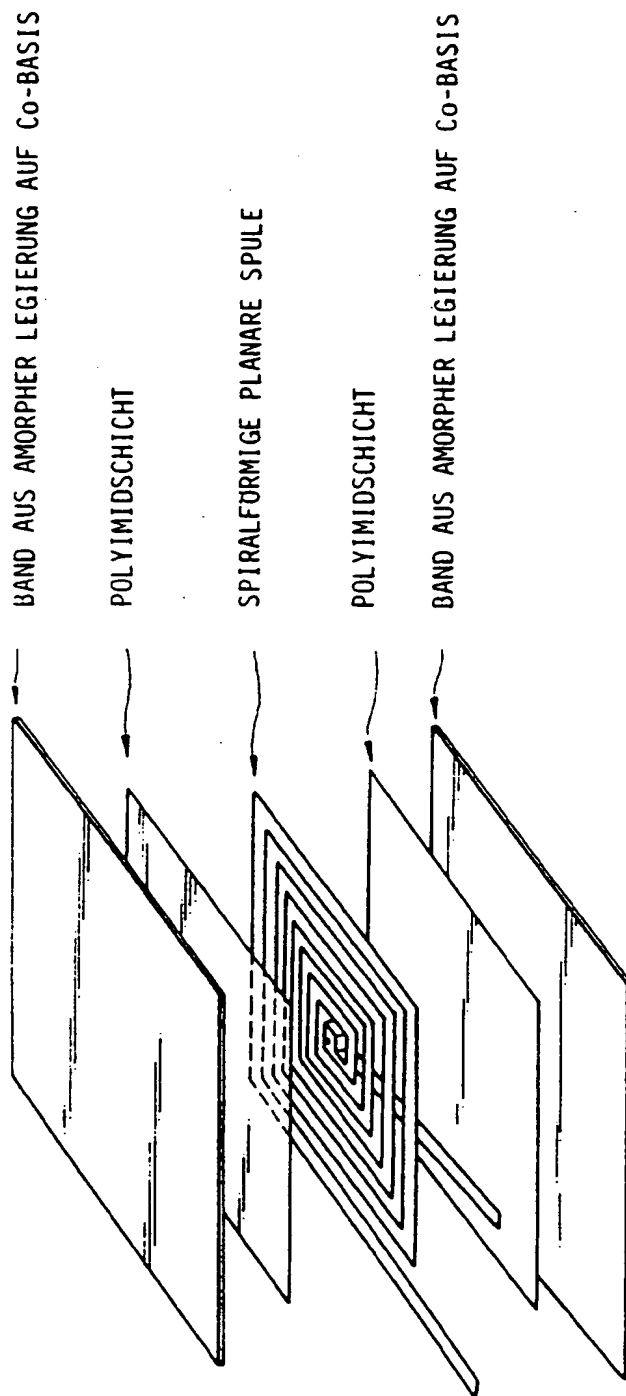


FIG. 1

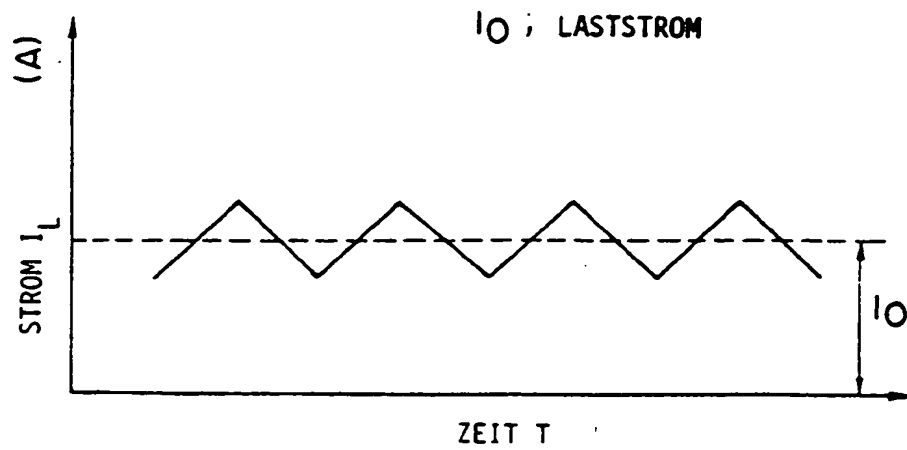


FIG. 2A

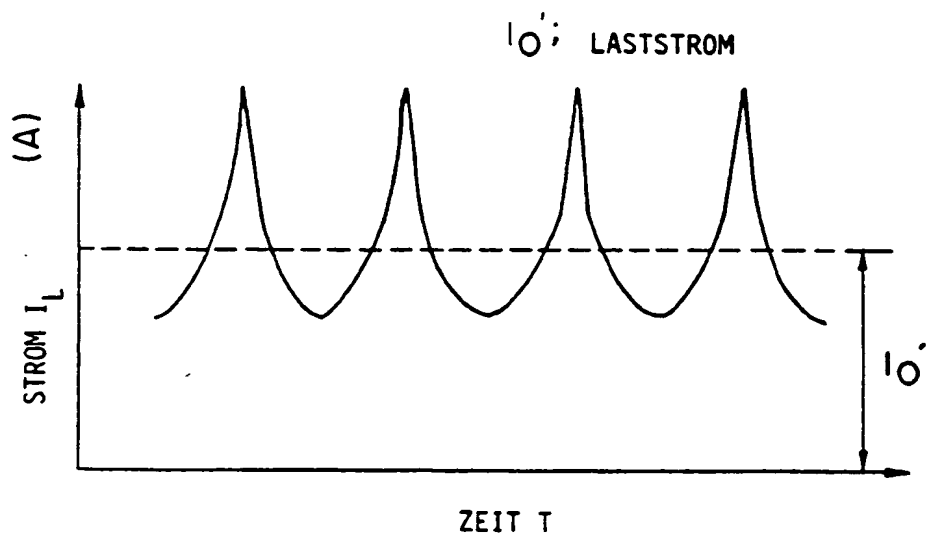


FIG. 2B



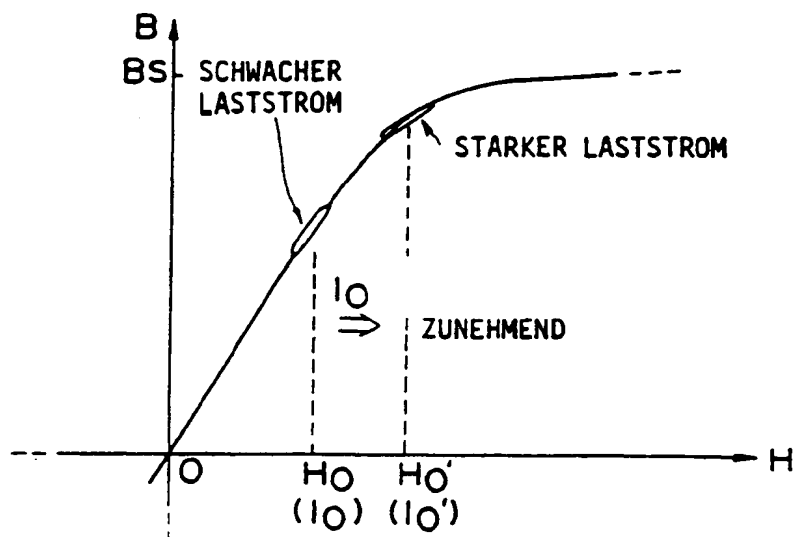


FIG. 3

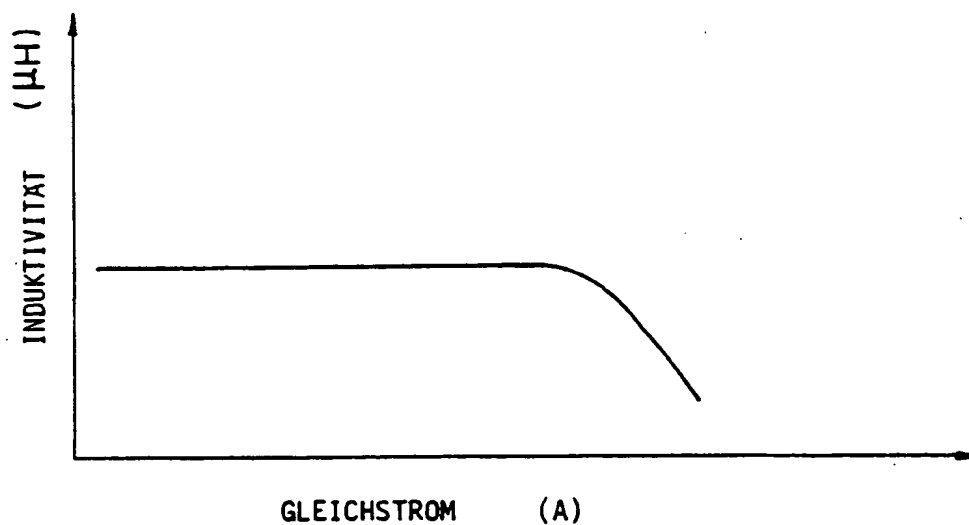


FIG. 4

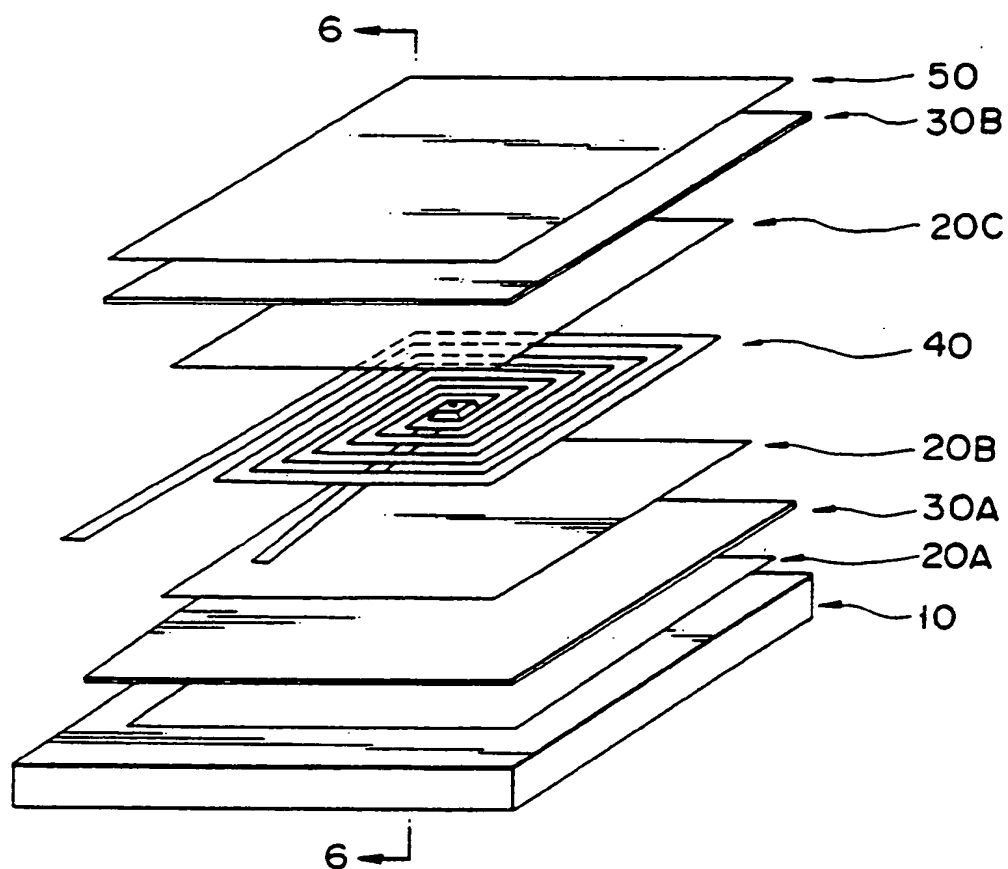


FIG. 5

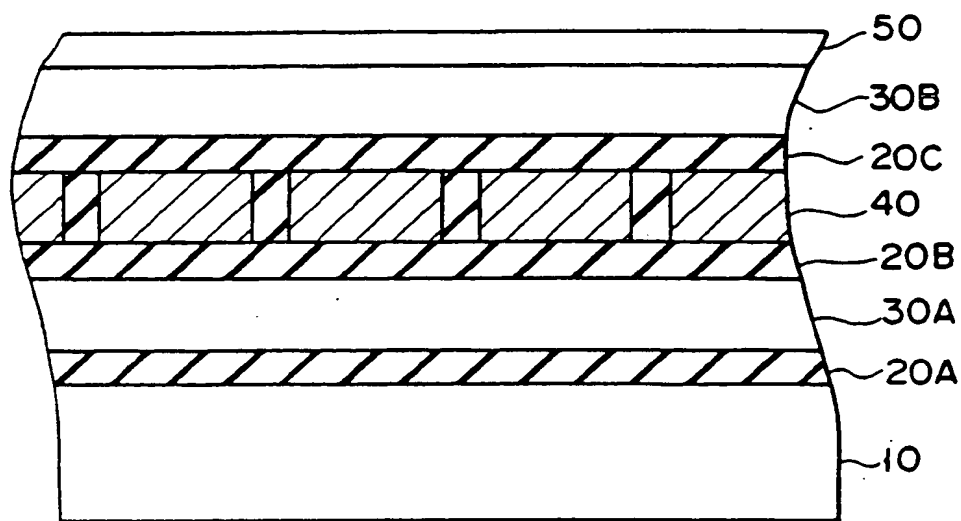


FIG. 6

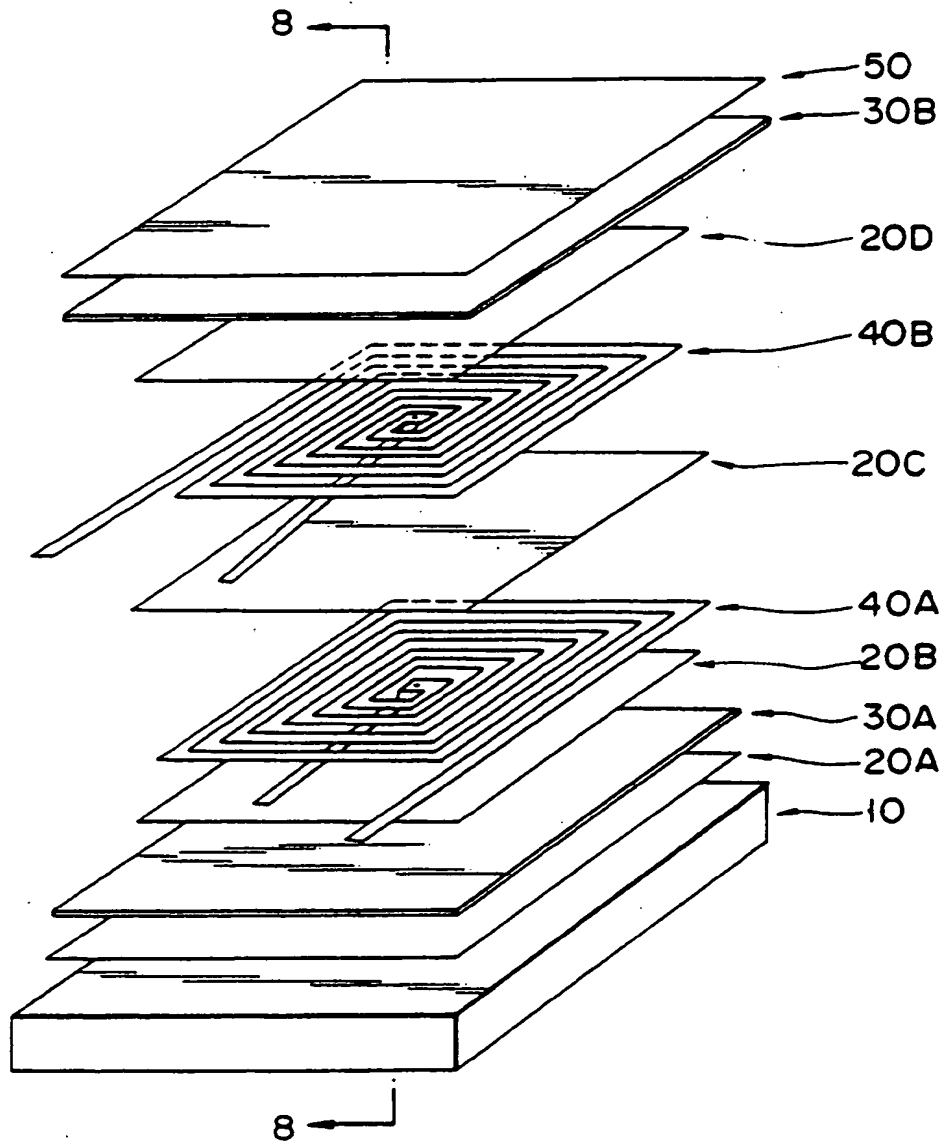


FIG. 7

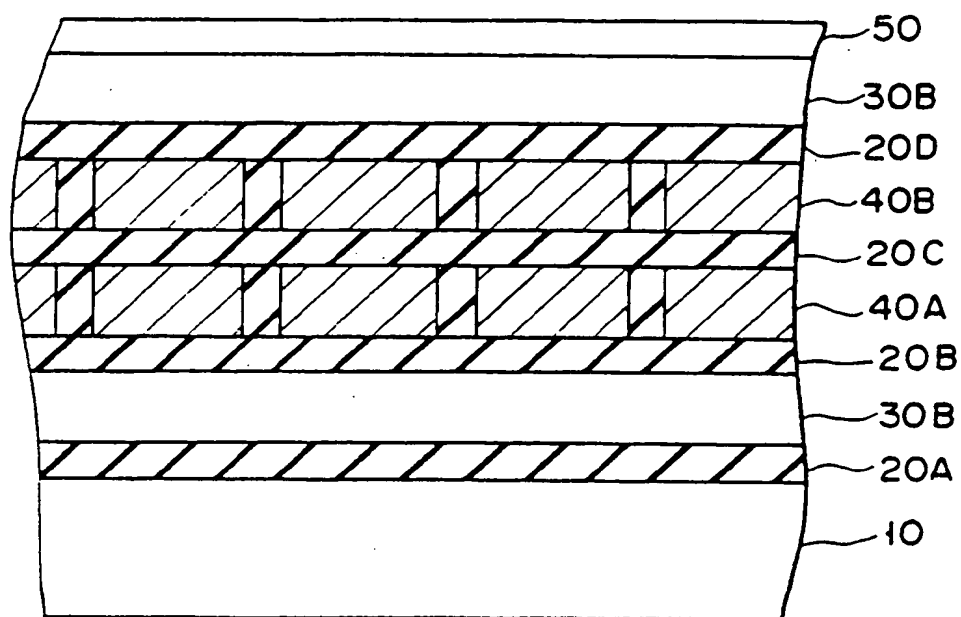


FIG. 8

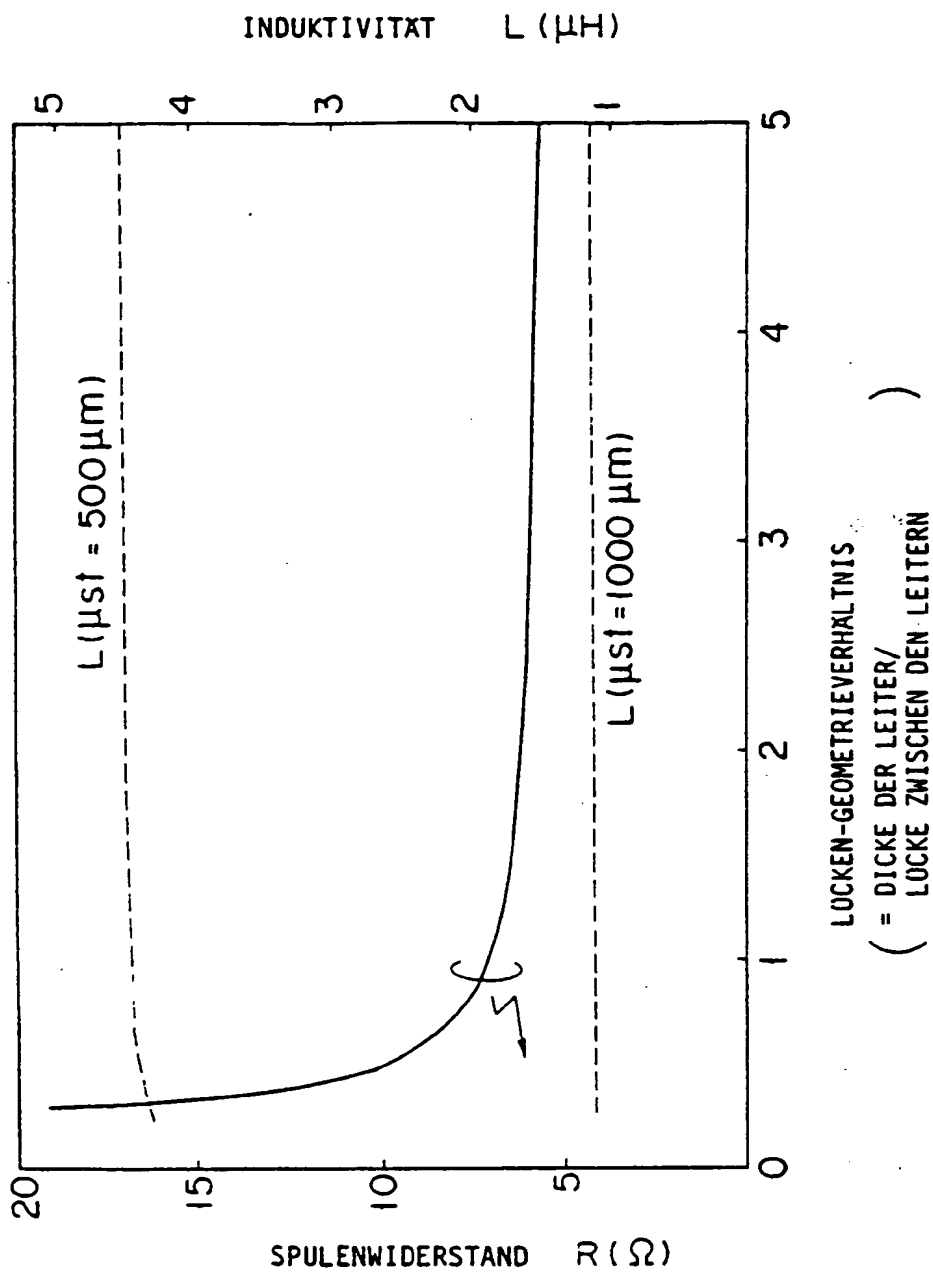


FIG. 9

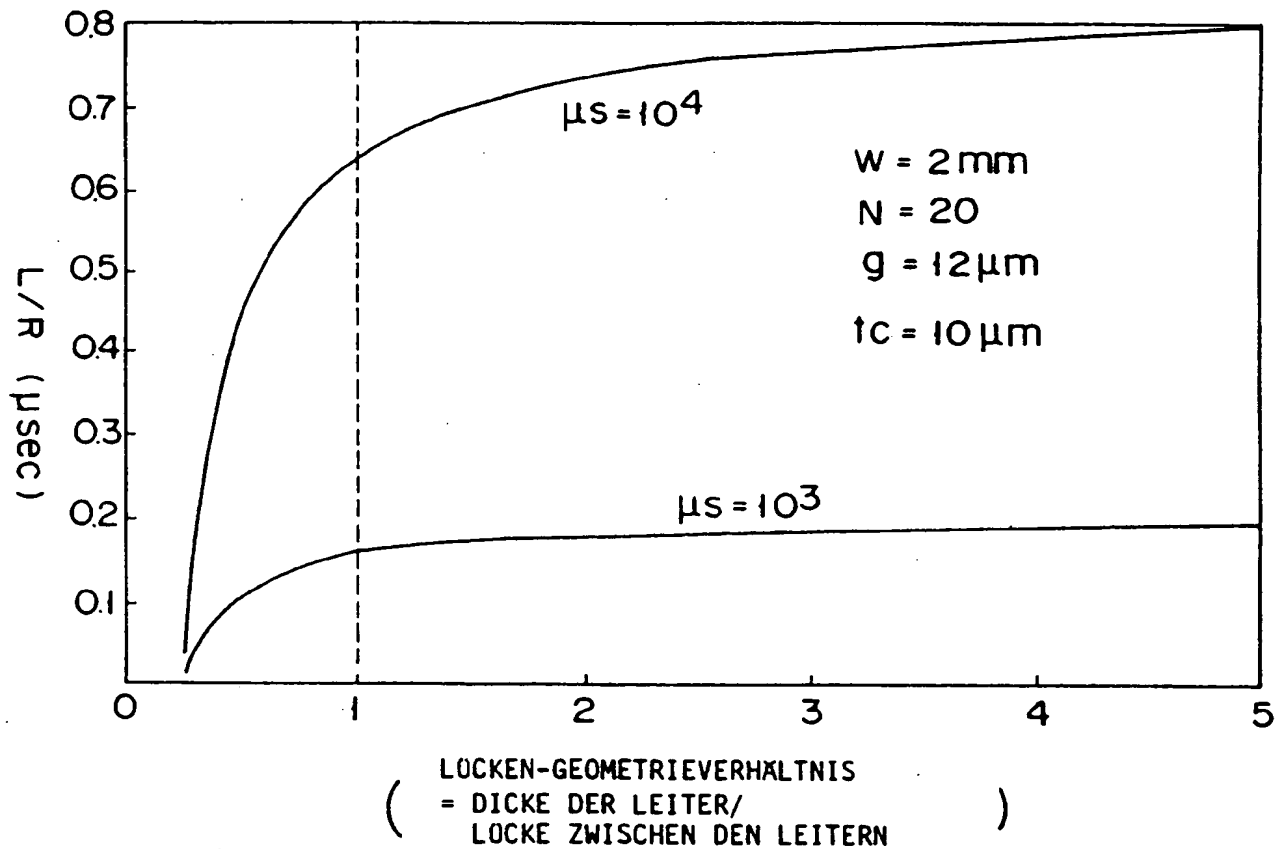


FIG. 10

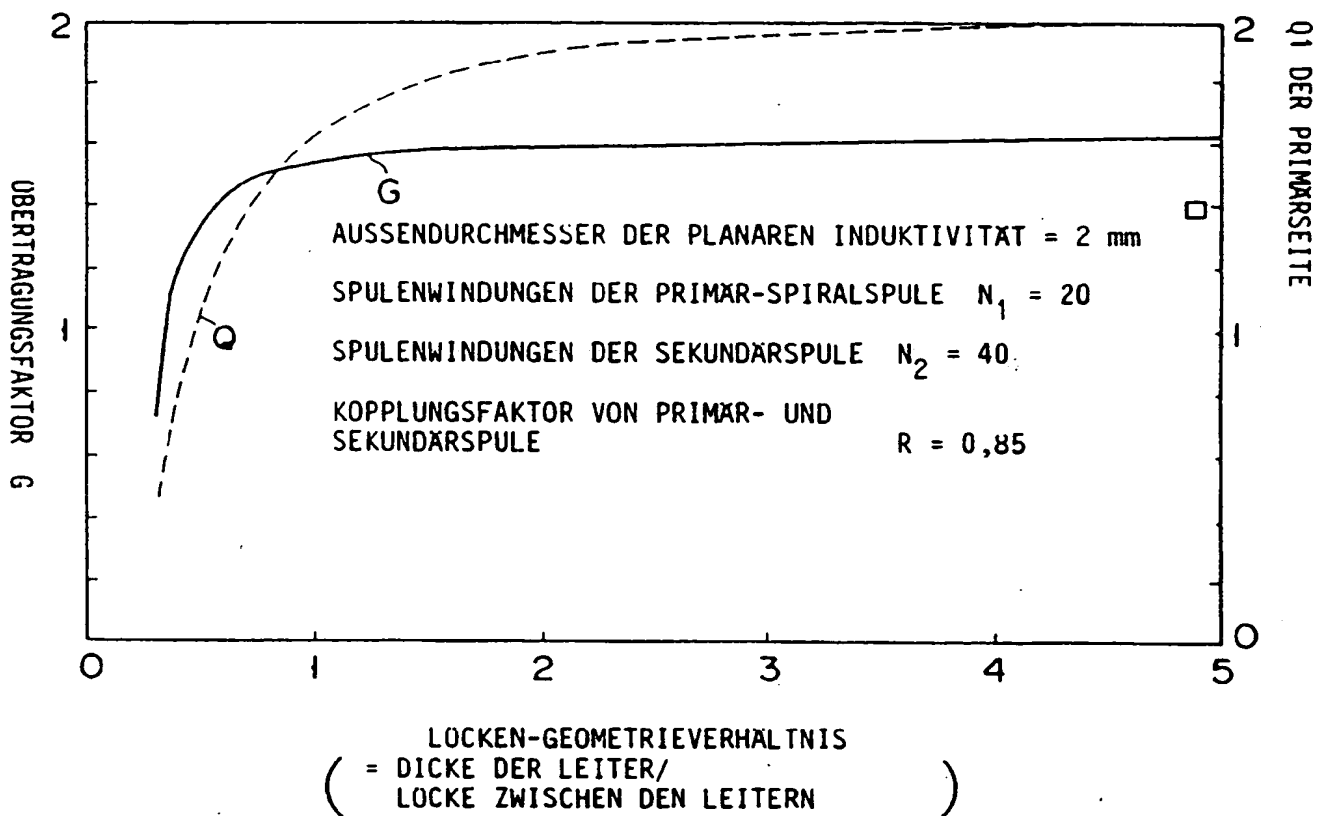


FIG. 11



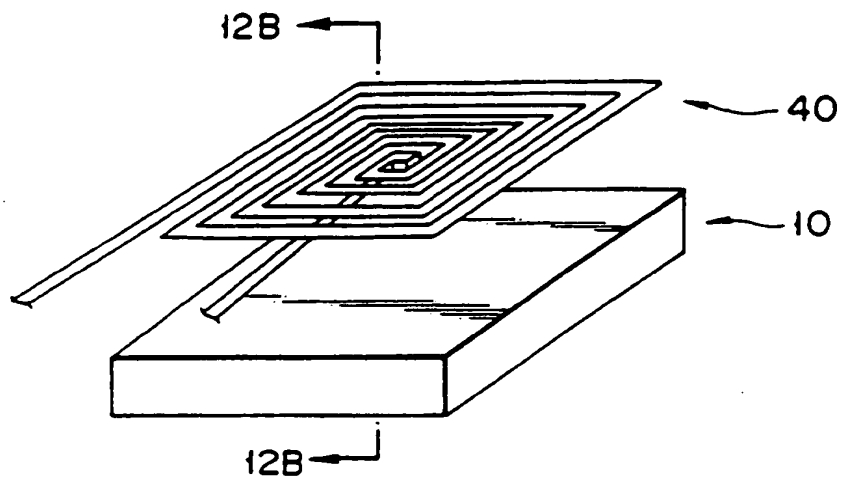


FIG. 12A

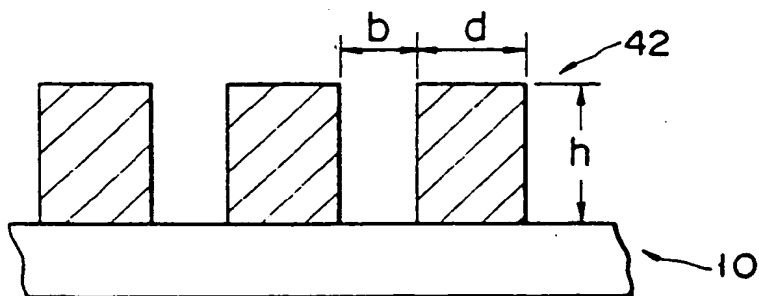


FIG. 12B

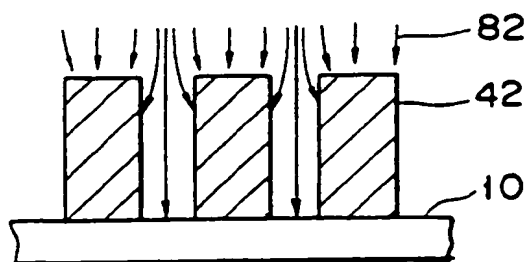


FIG. 13A

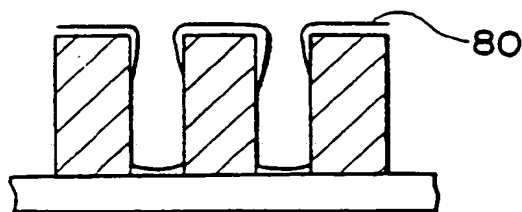


FIG. 13B

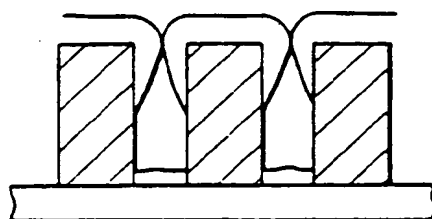


FIG. 13C

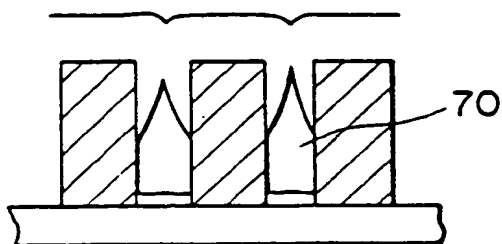


FIG. 13D

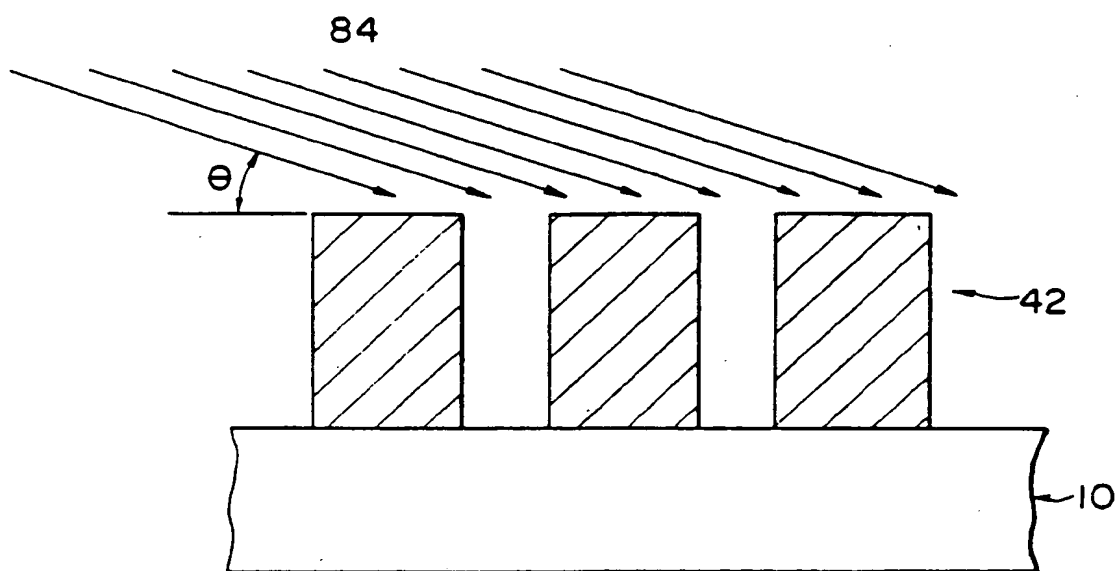


FIG. 14

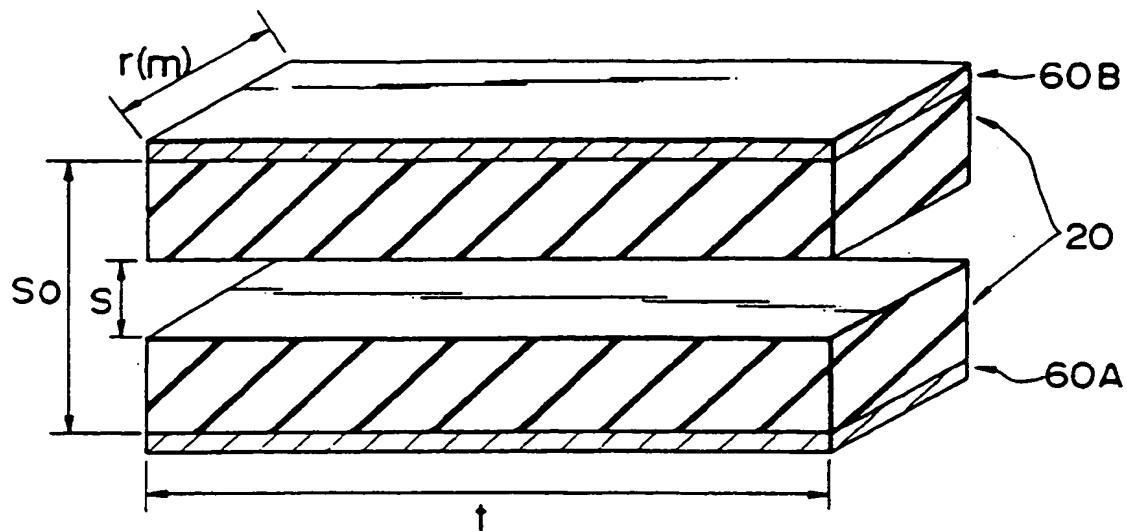


FIG. 15

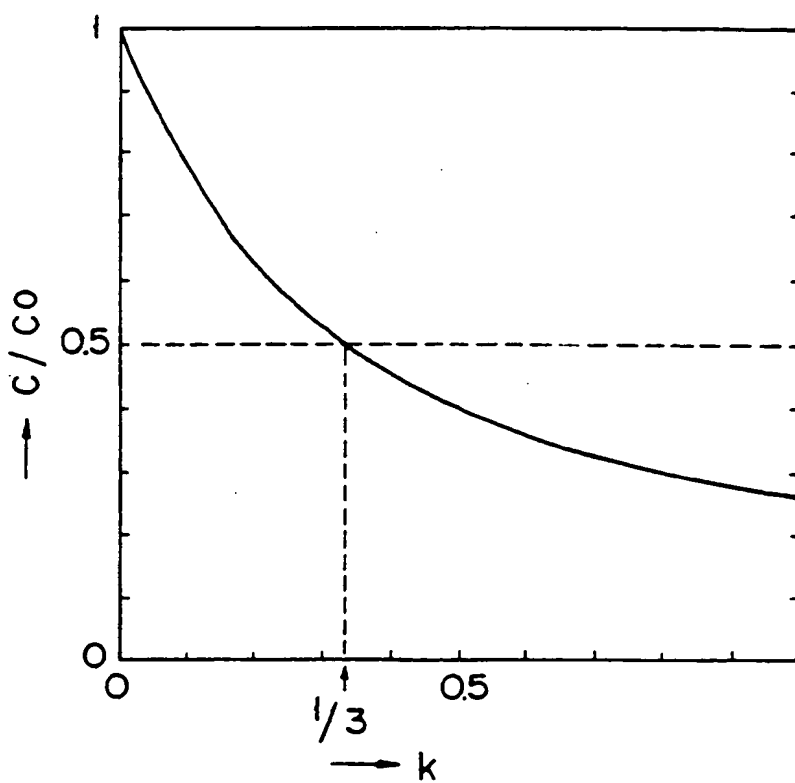


FIG. 16

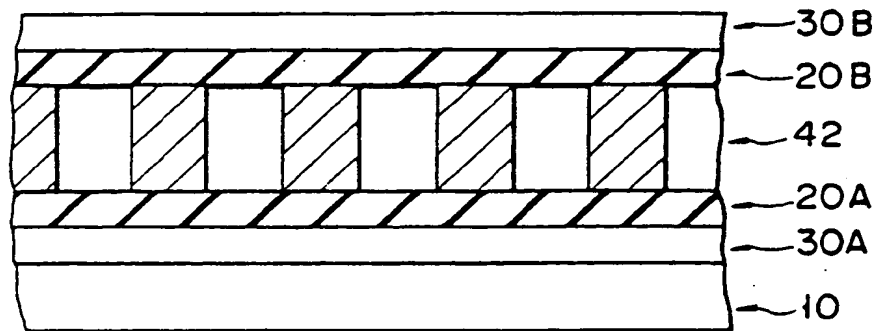


FIG. 17

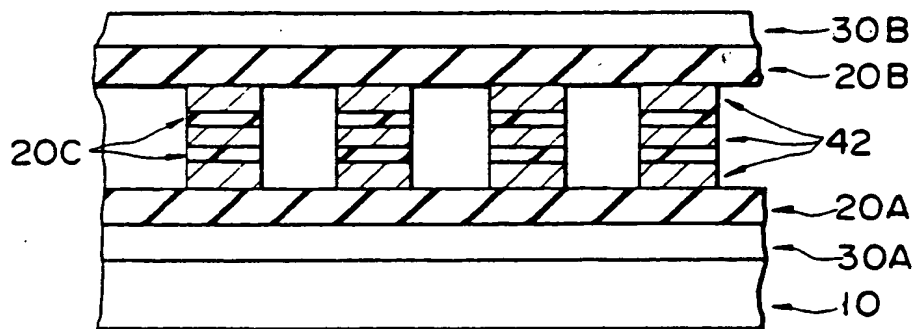


FIG. 18

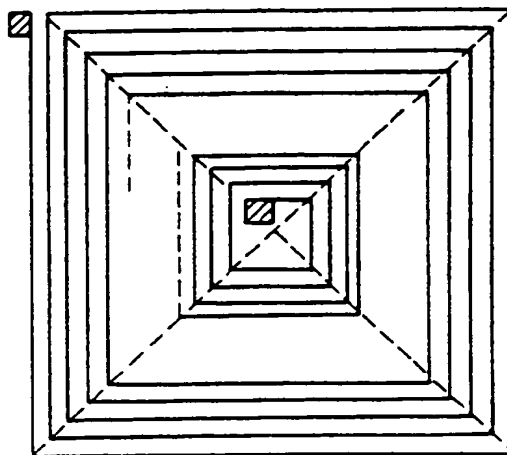


FIG. 19A

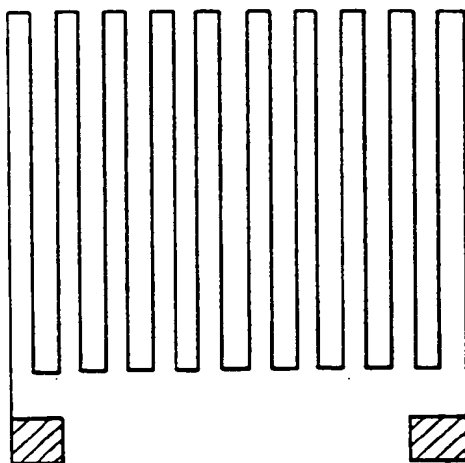


FIG. 19B

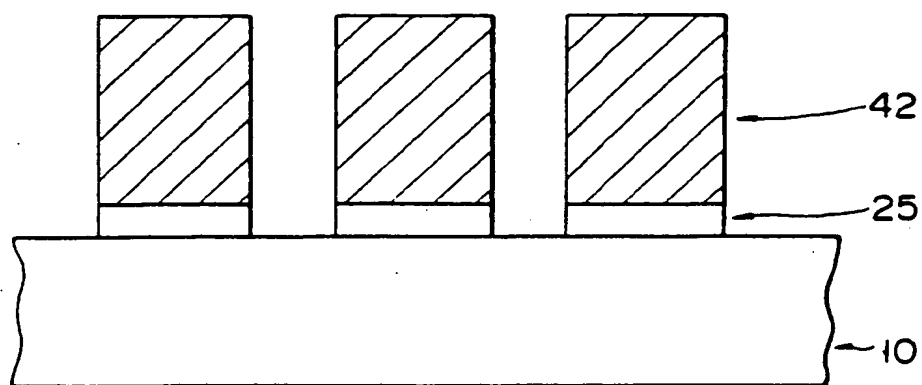


FIG. 20

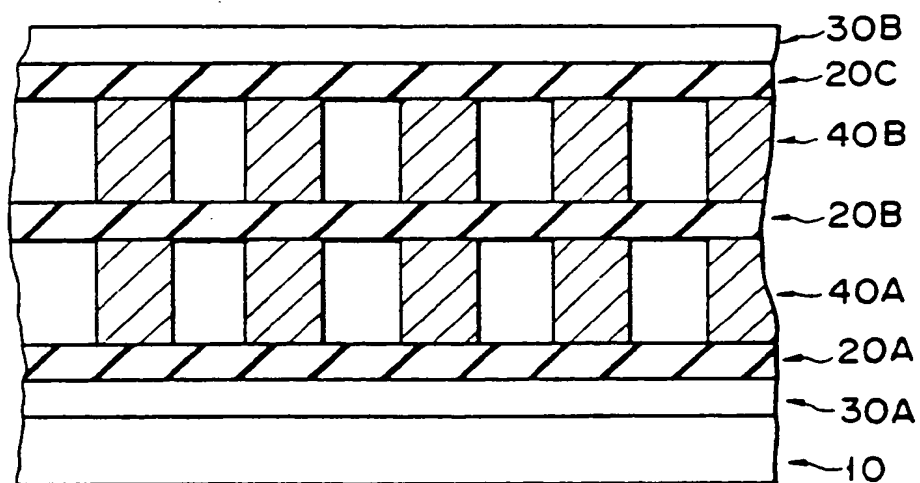


FIG. 21

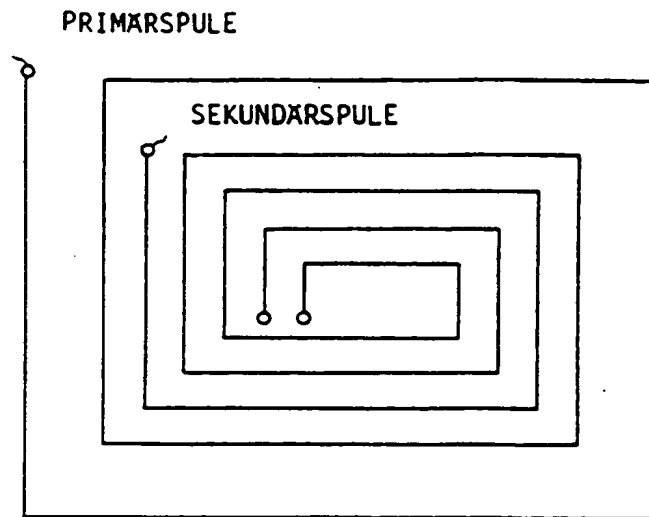


FIG. 22 A

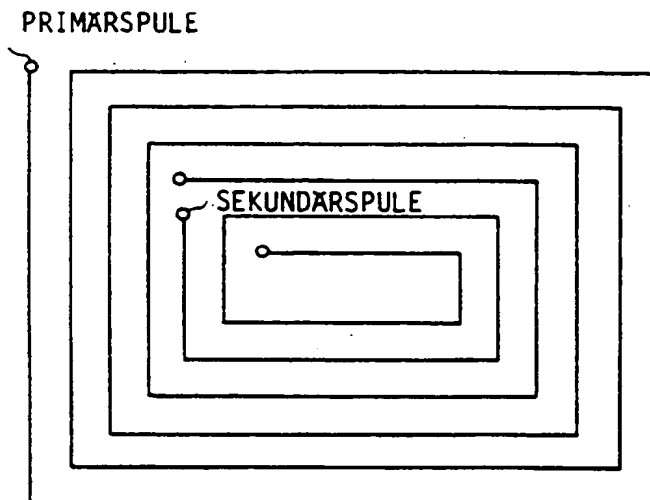


FIG. 22 B



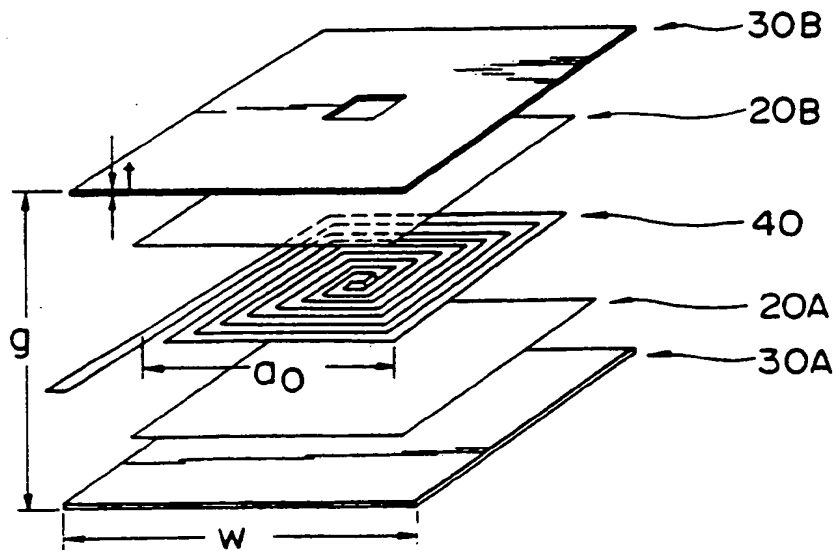


FIG. 23

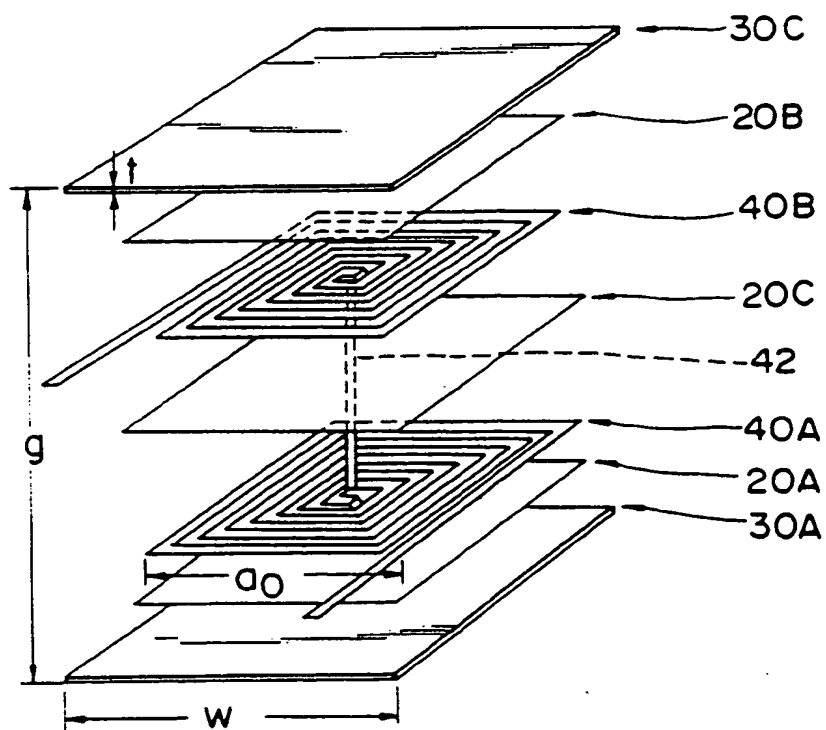


FIG. 24

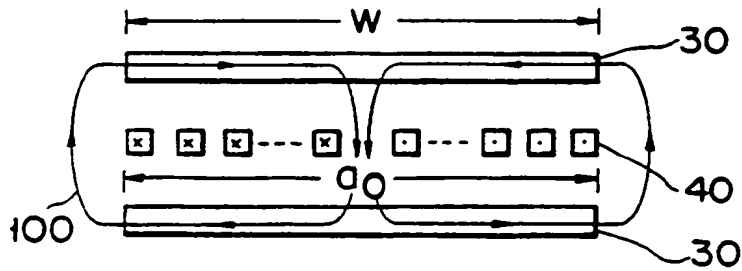


FIG. 25A

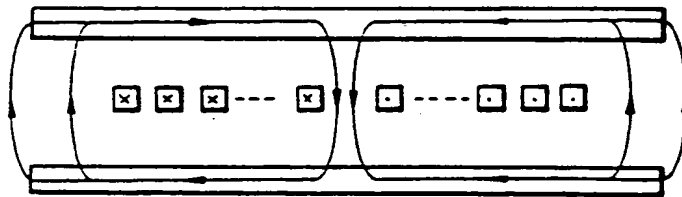


FIG. 25B

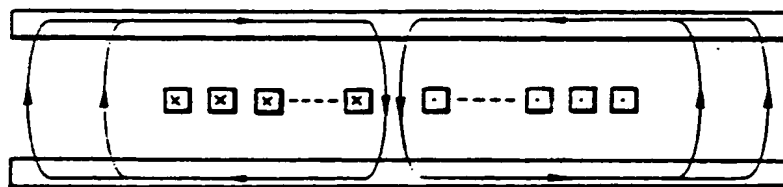


FIG. 25C

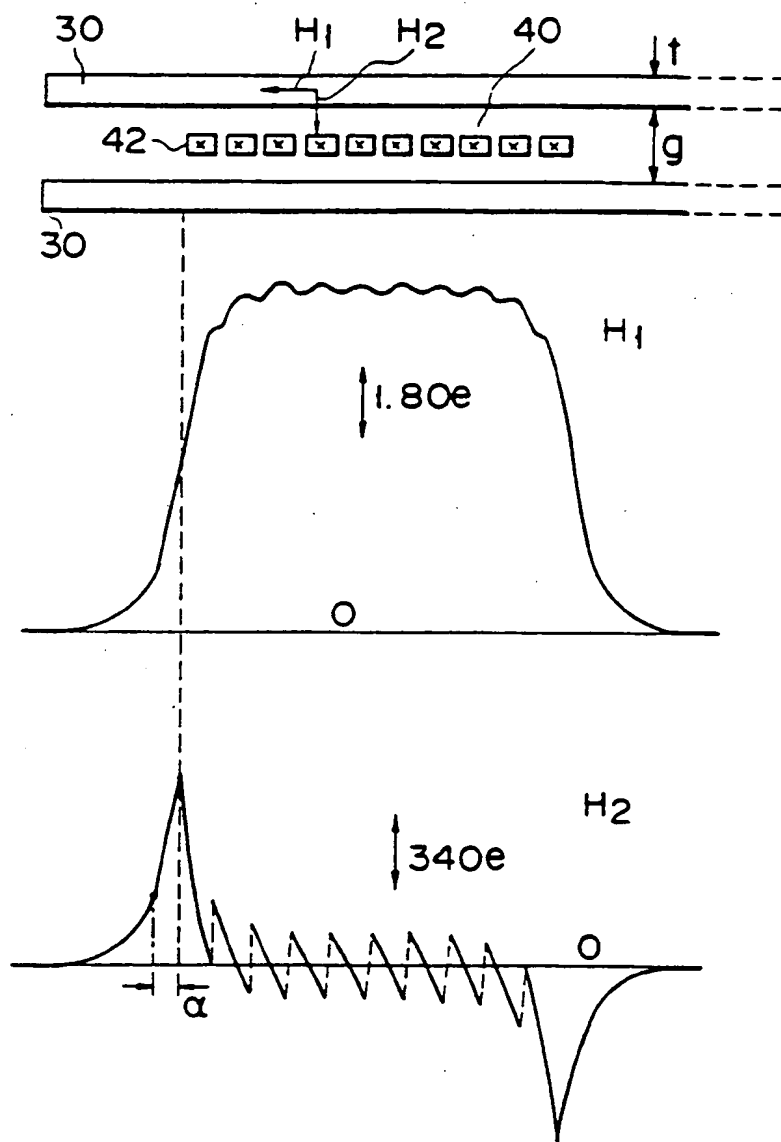


FIG. 26

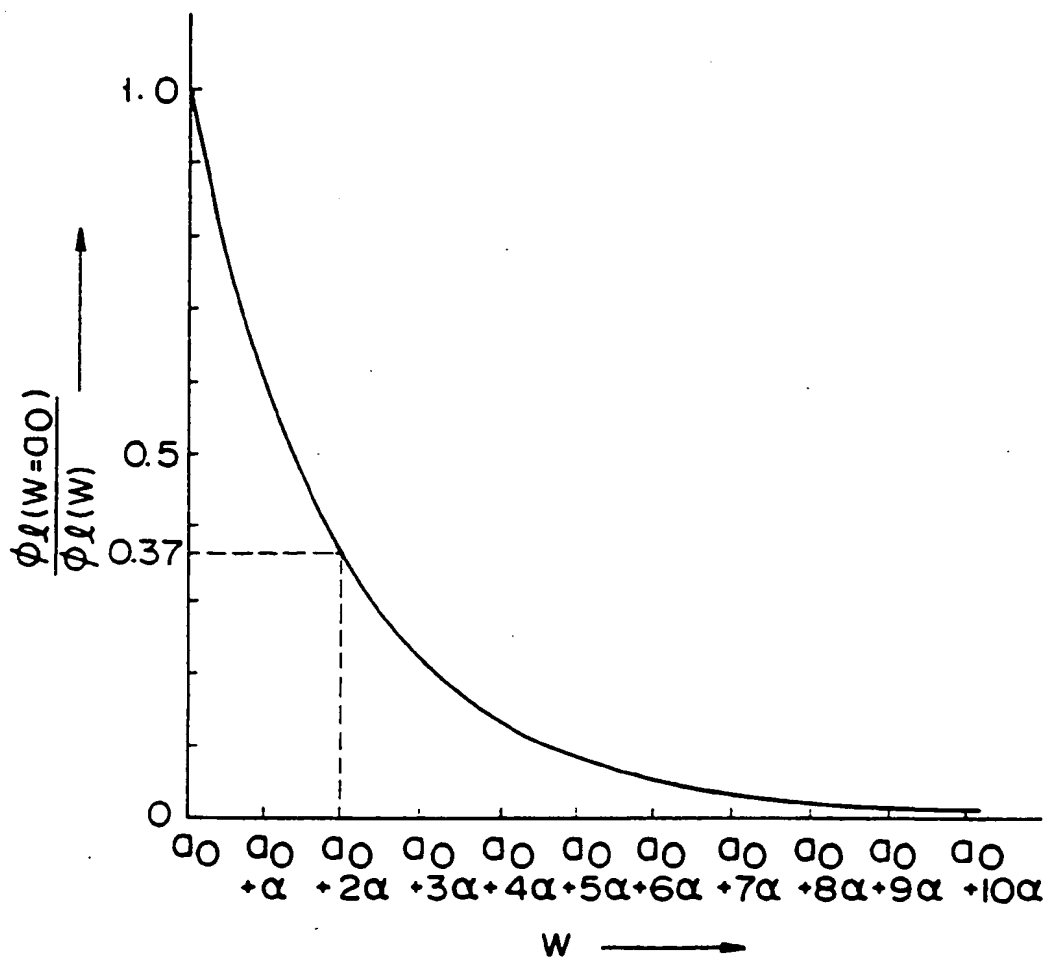
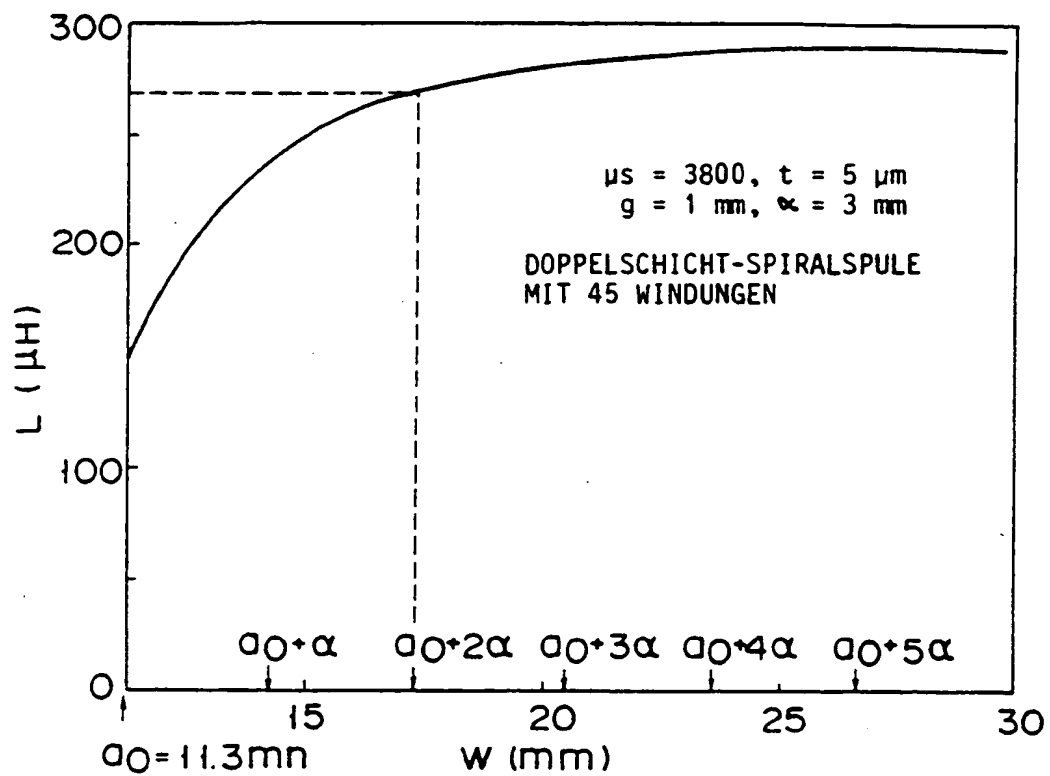


FIG. 27



F I G. 28

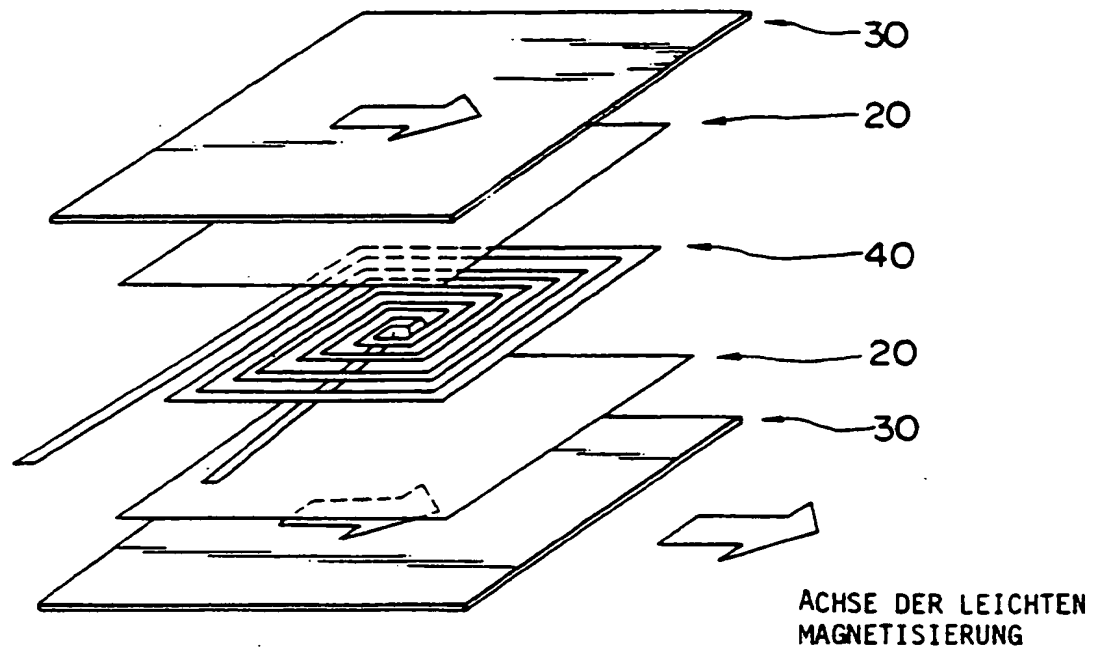


FIG. 29

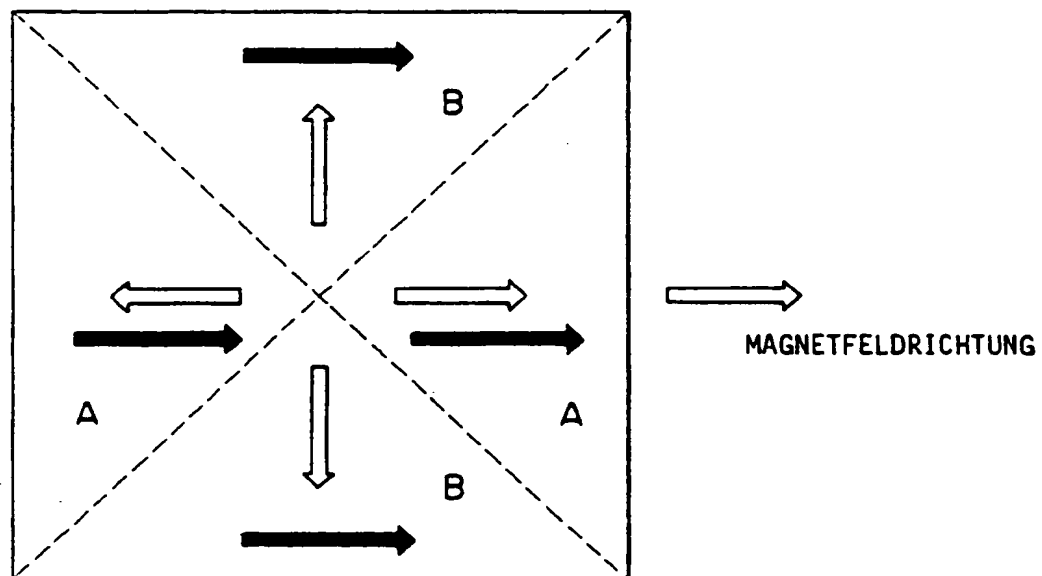


FIG. 30

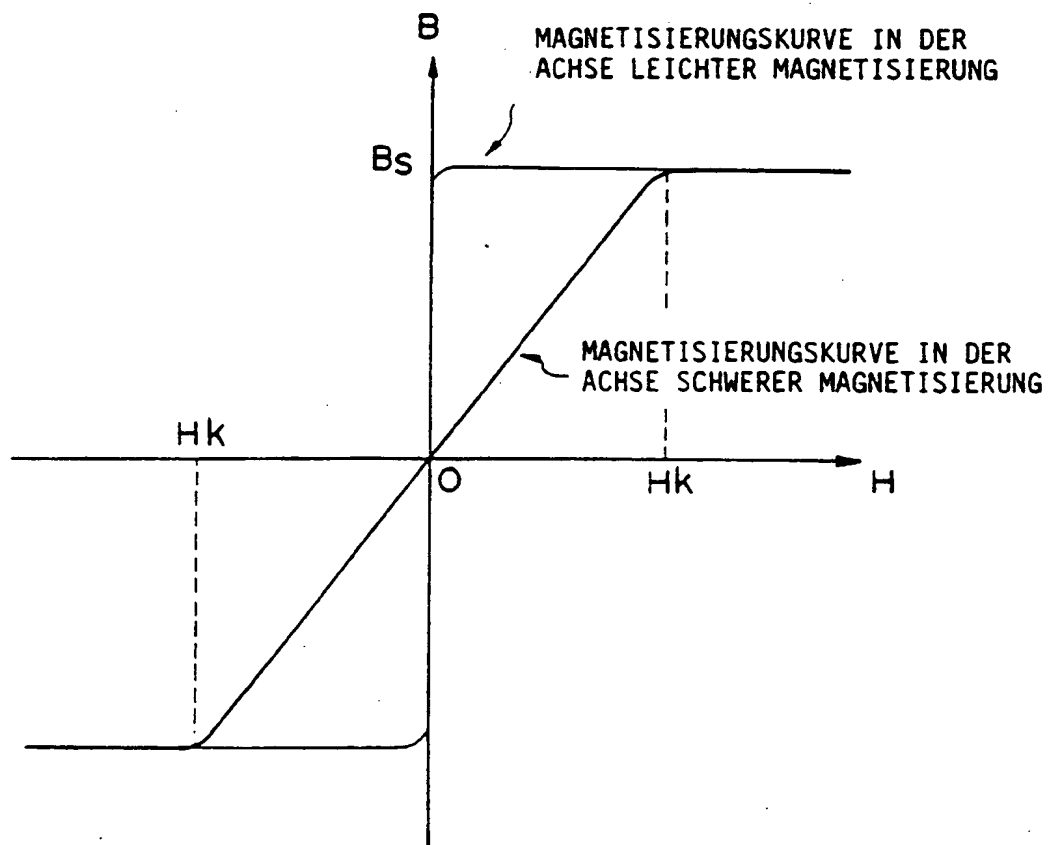
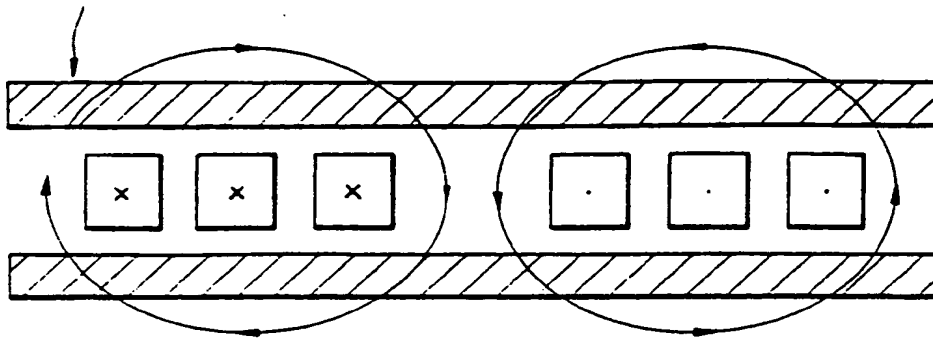


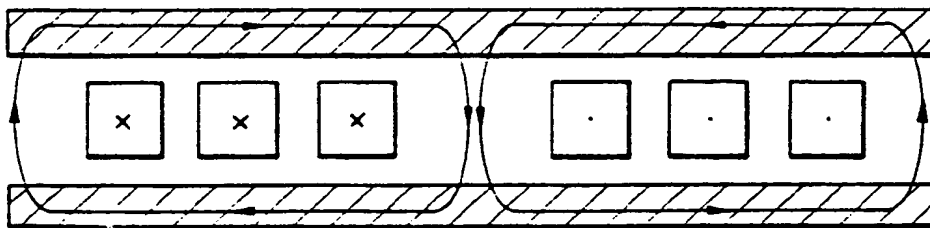
FIG. 31

A-BEREICH VON FIG. 30



F I G. 32A

B-BEREICH VON FIG. 30



F I G. 32B



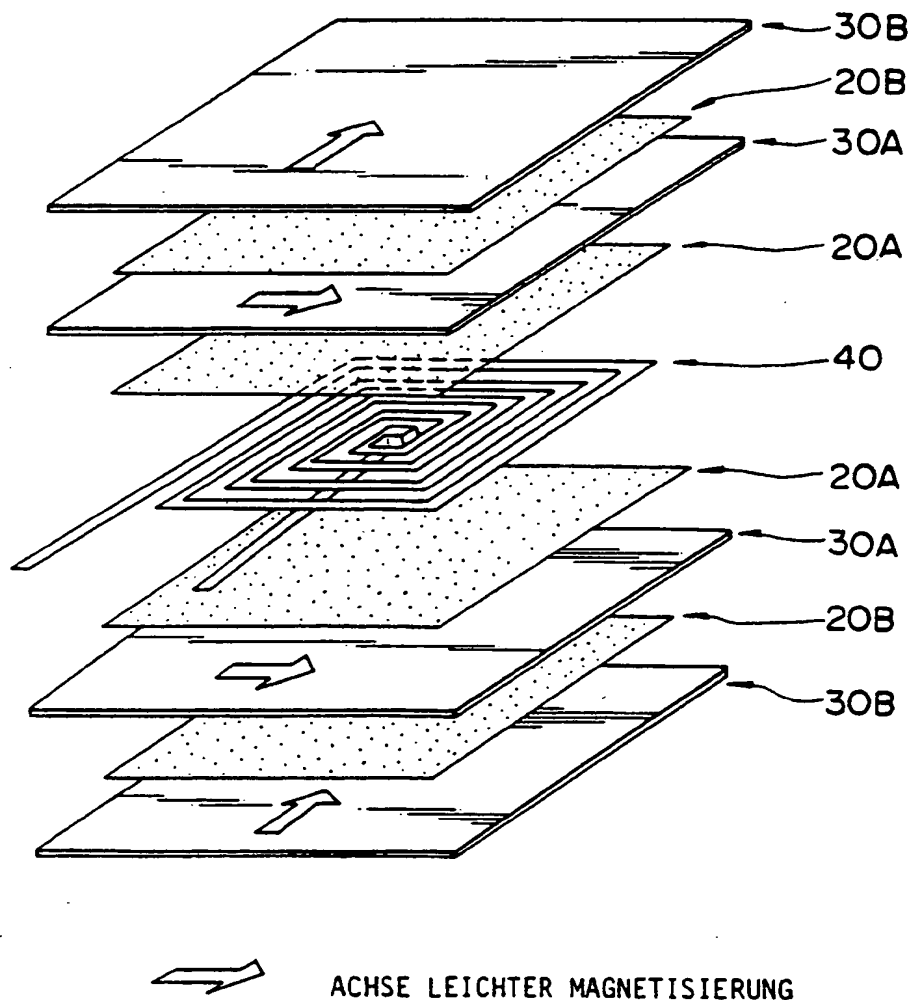


FIG. 33

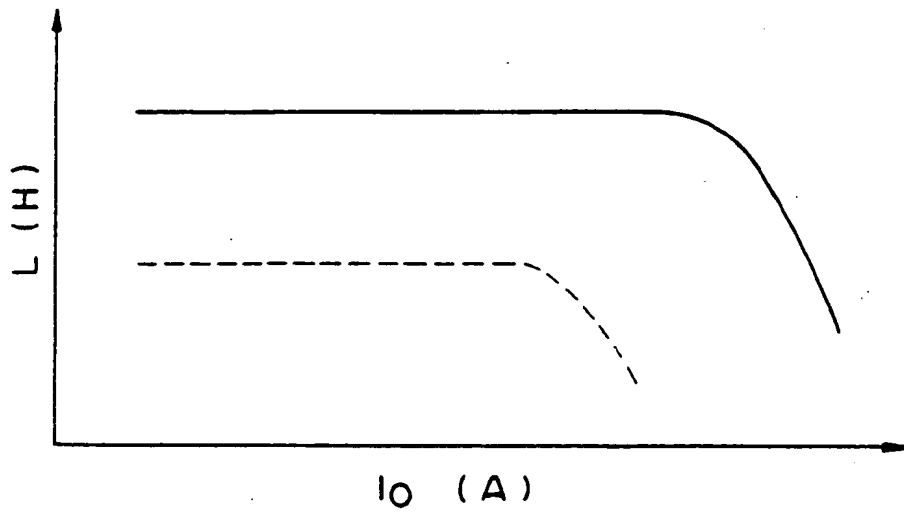


FIG. 34

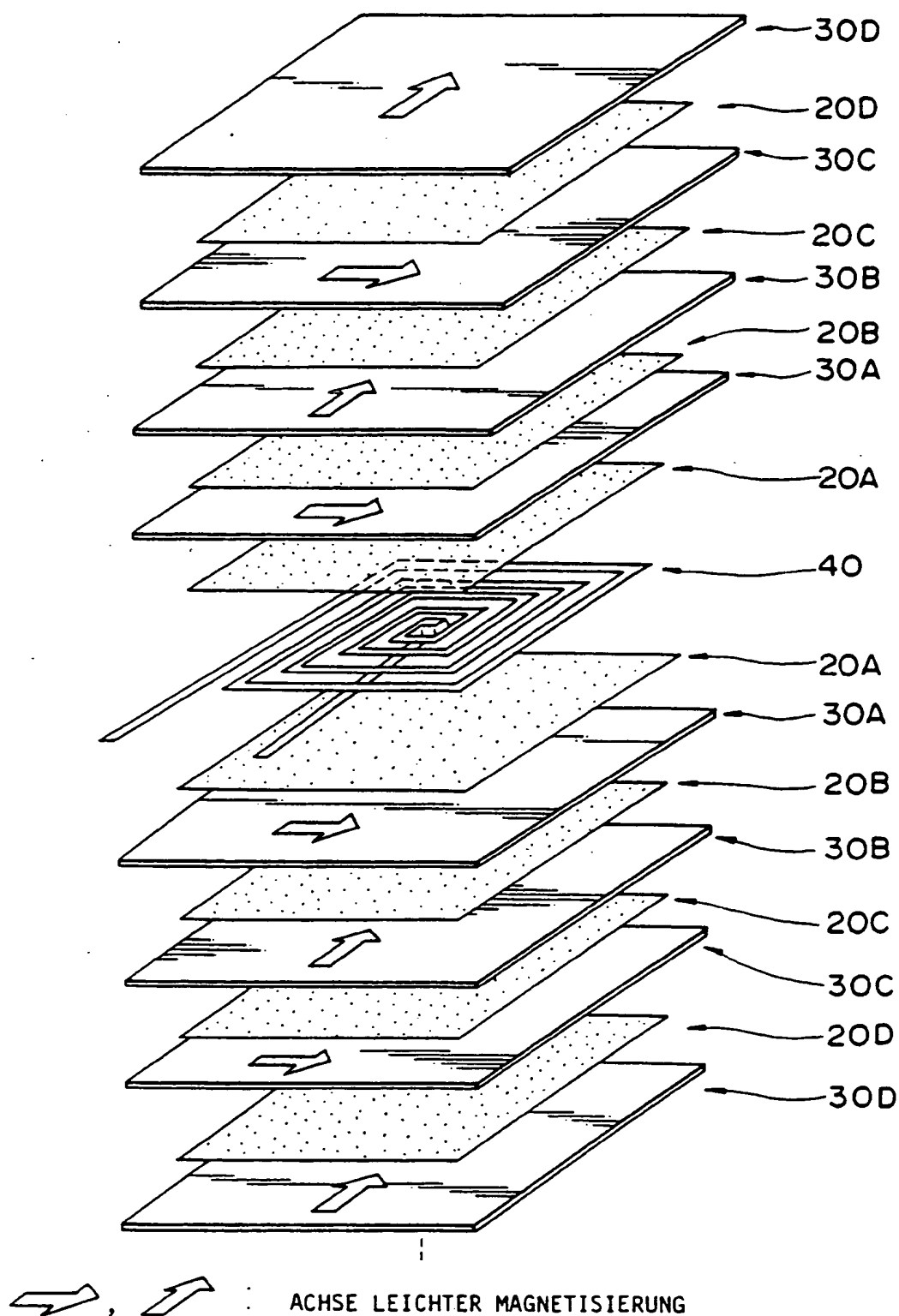


FIG. 35

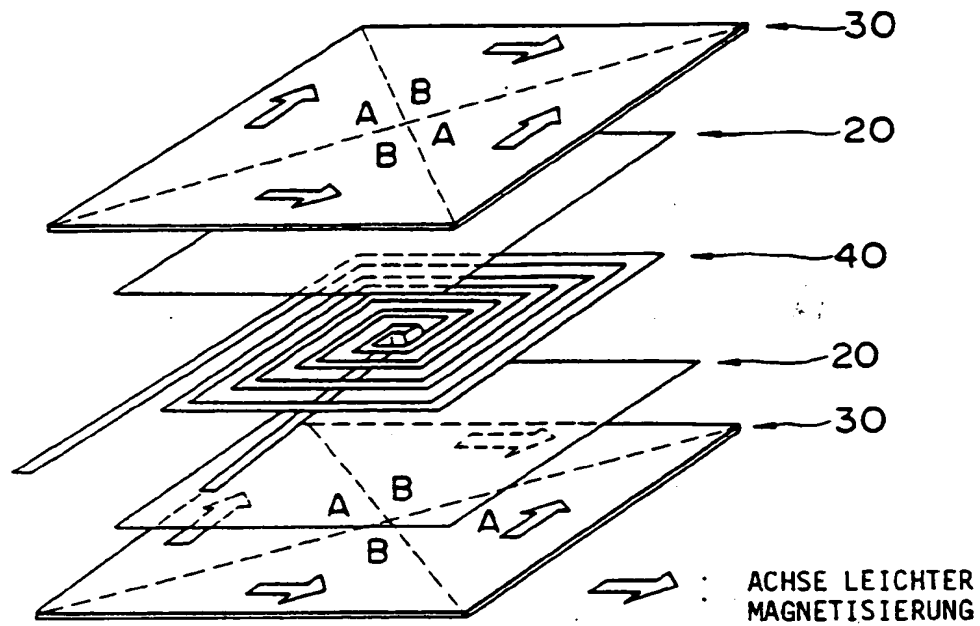


FIG. 36

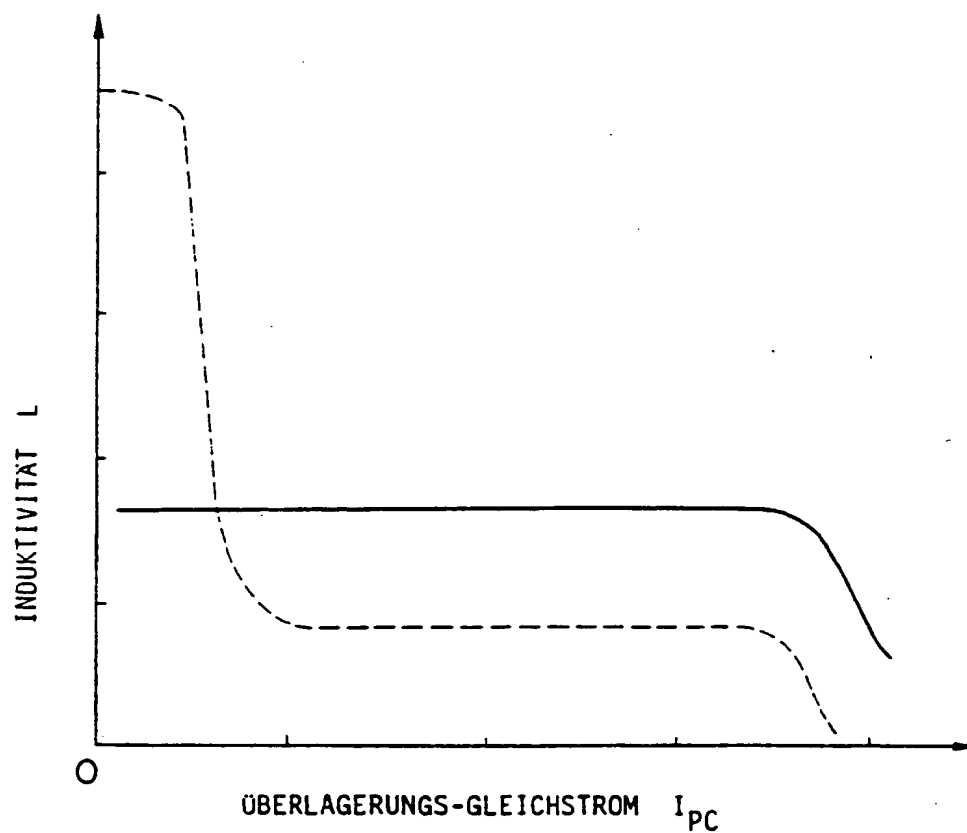
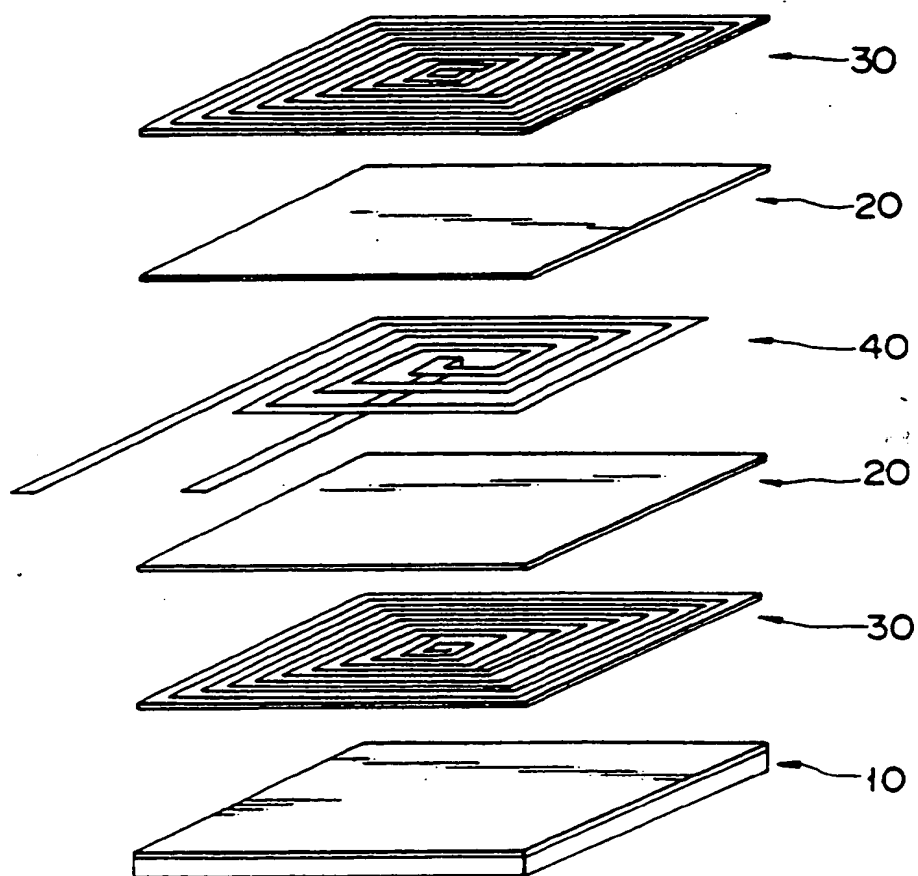
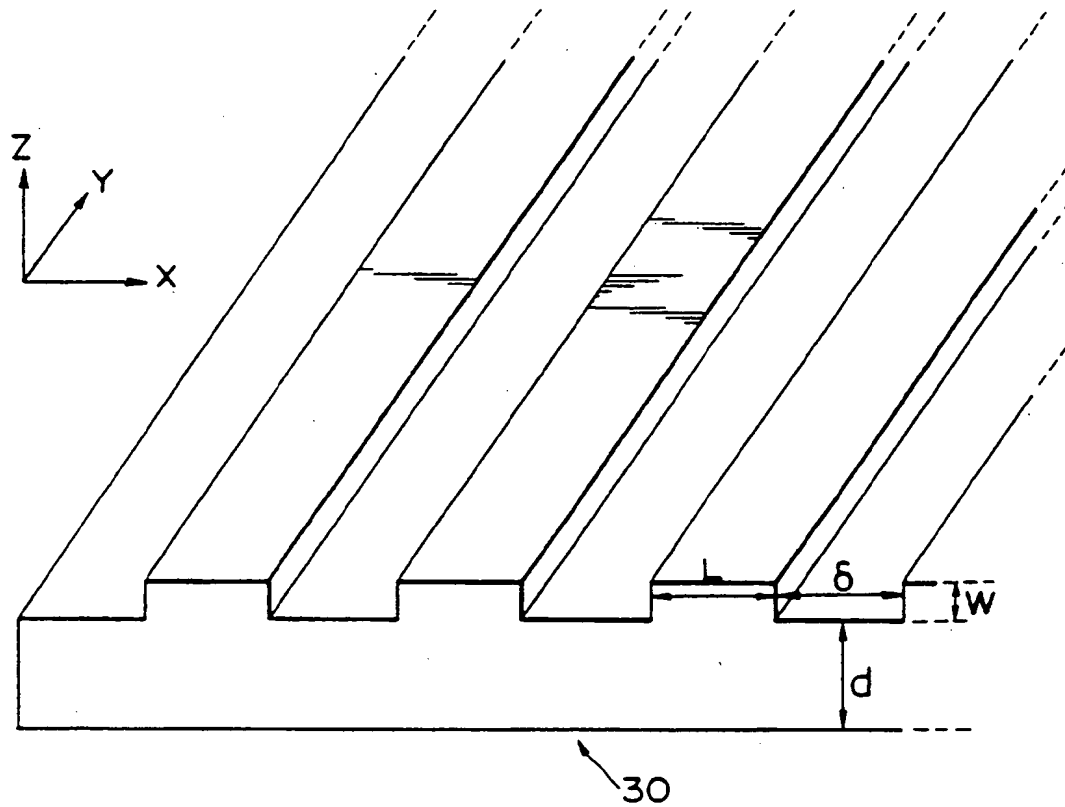


FIG. 37



F I G. 38



F I G. 39

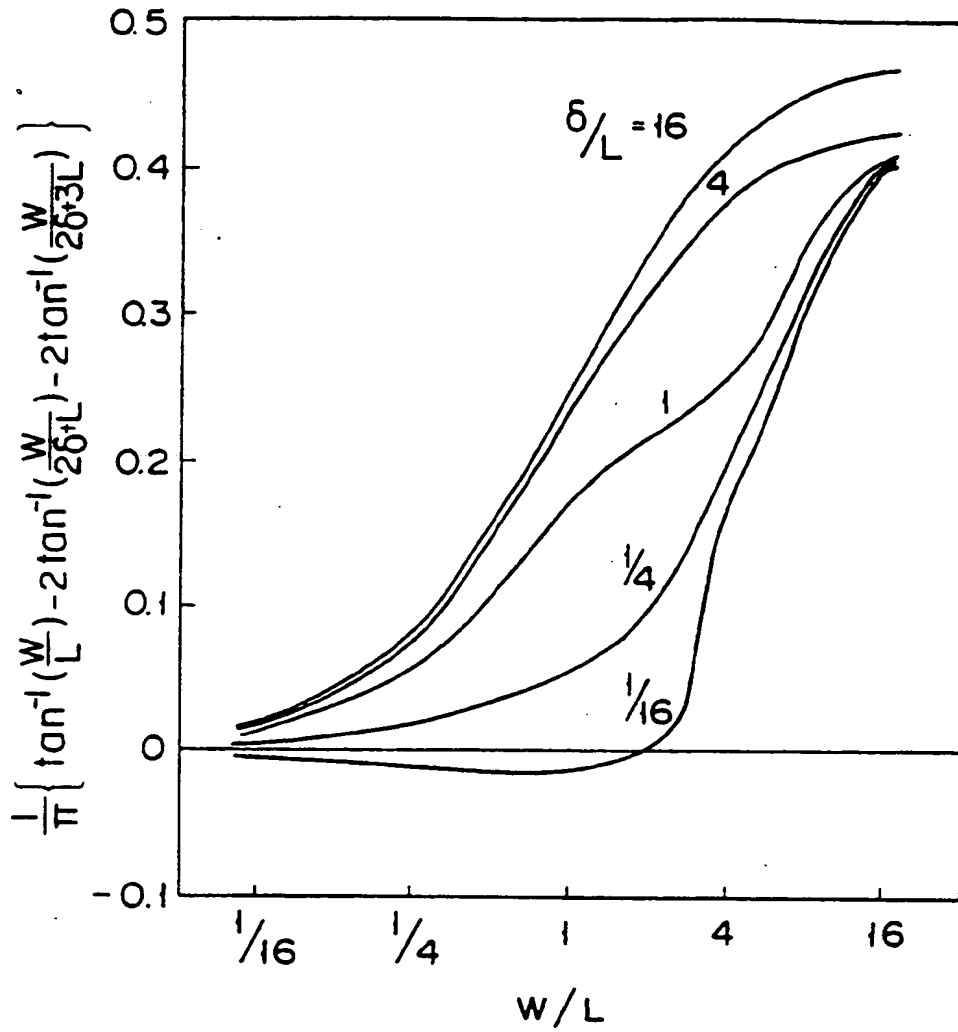


FIG. 40



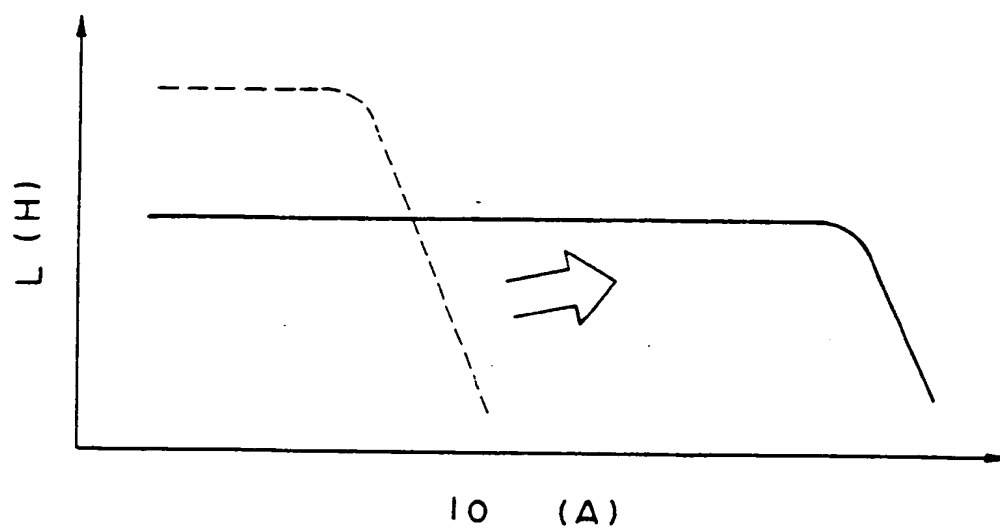
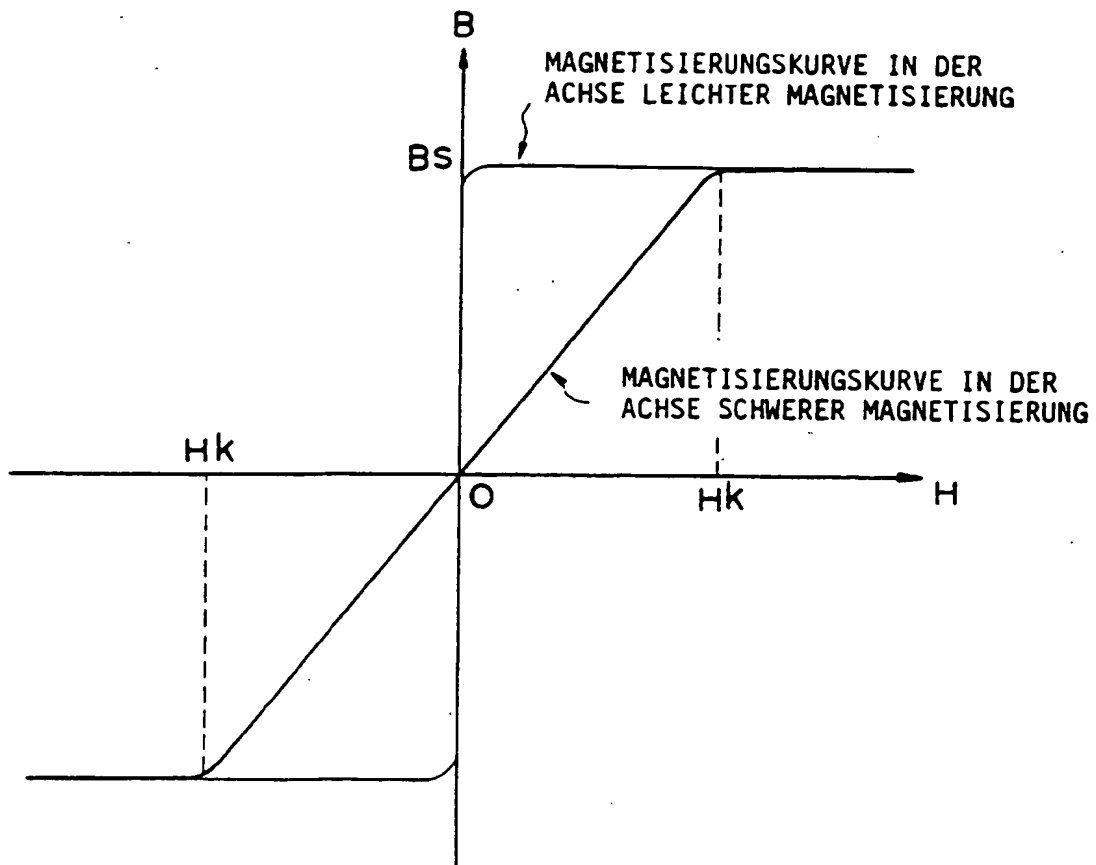
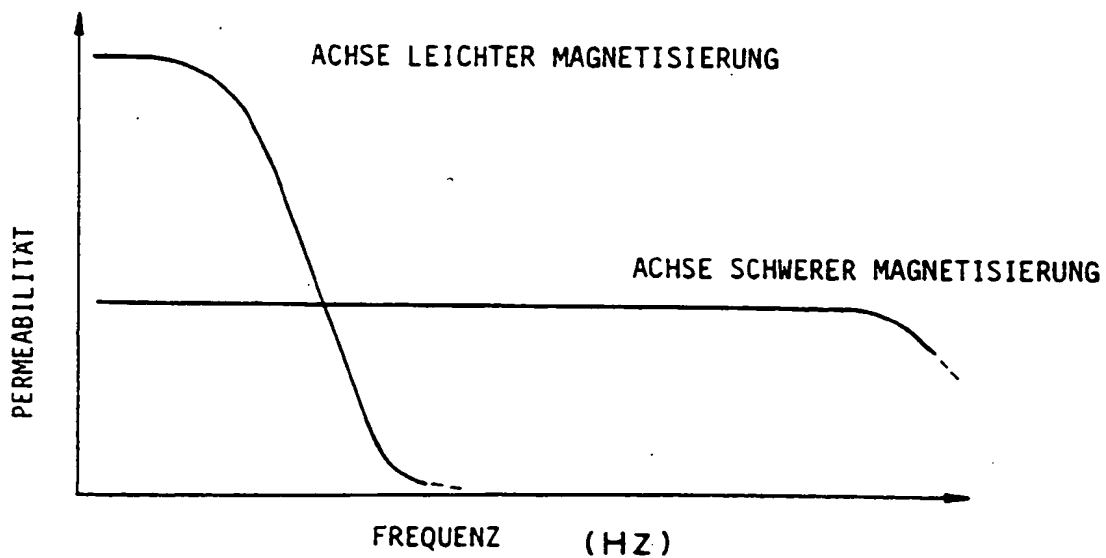


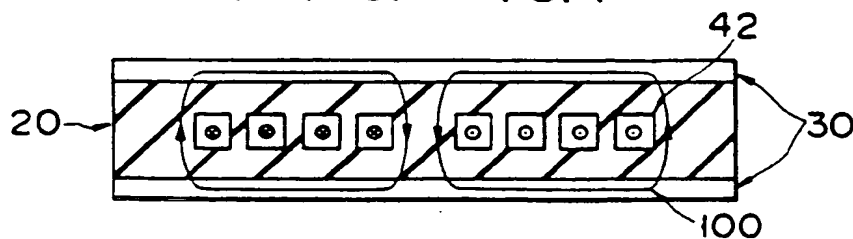
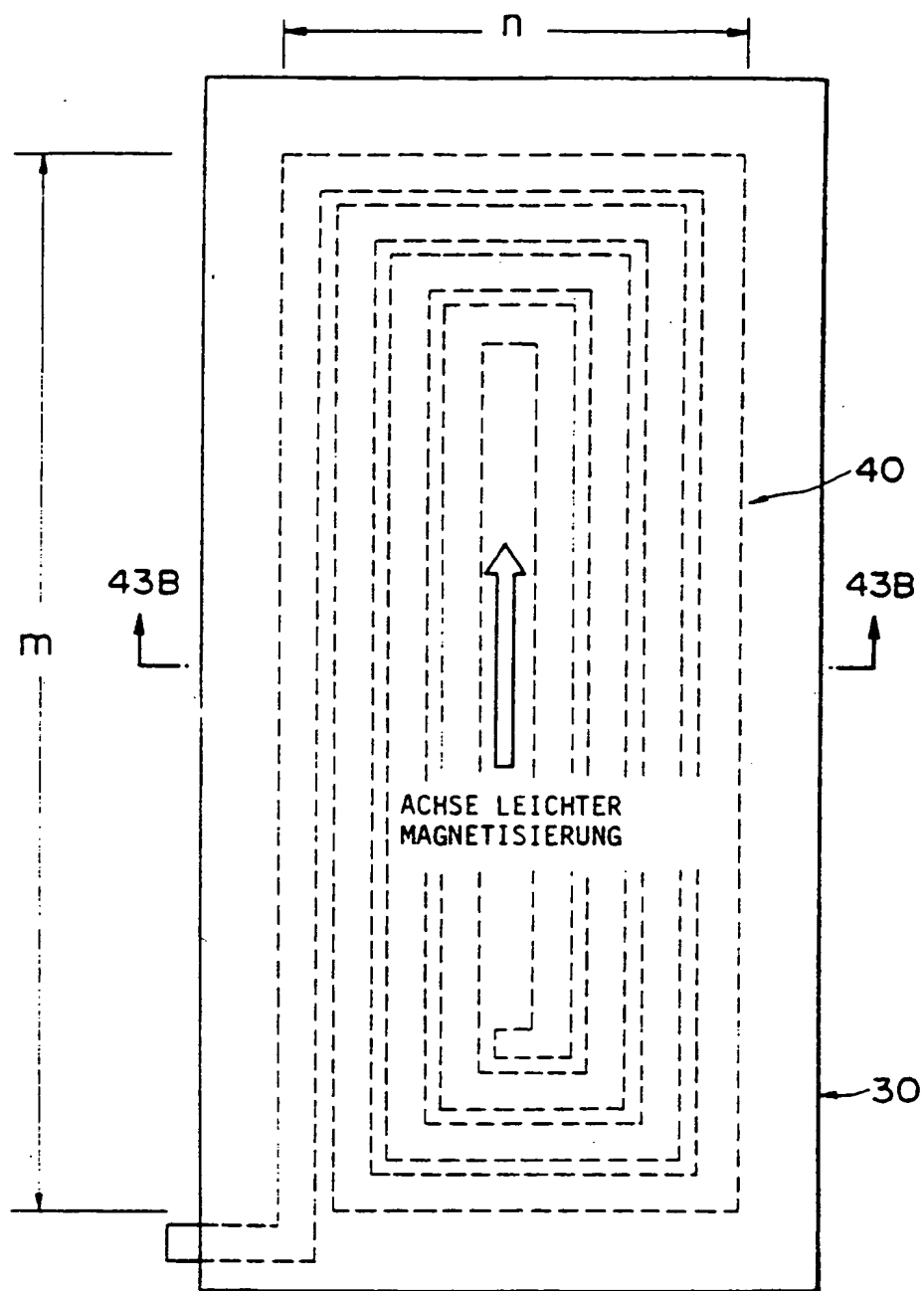
FIG. 41



F I G. 42A



F I G. 42B



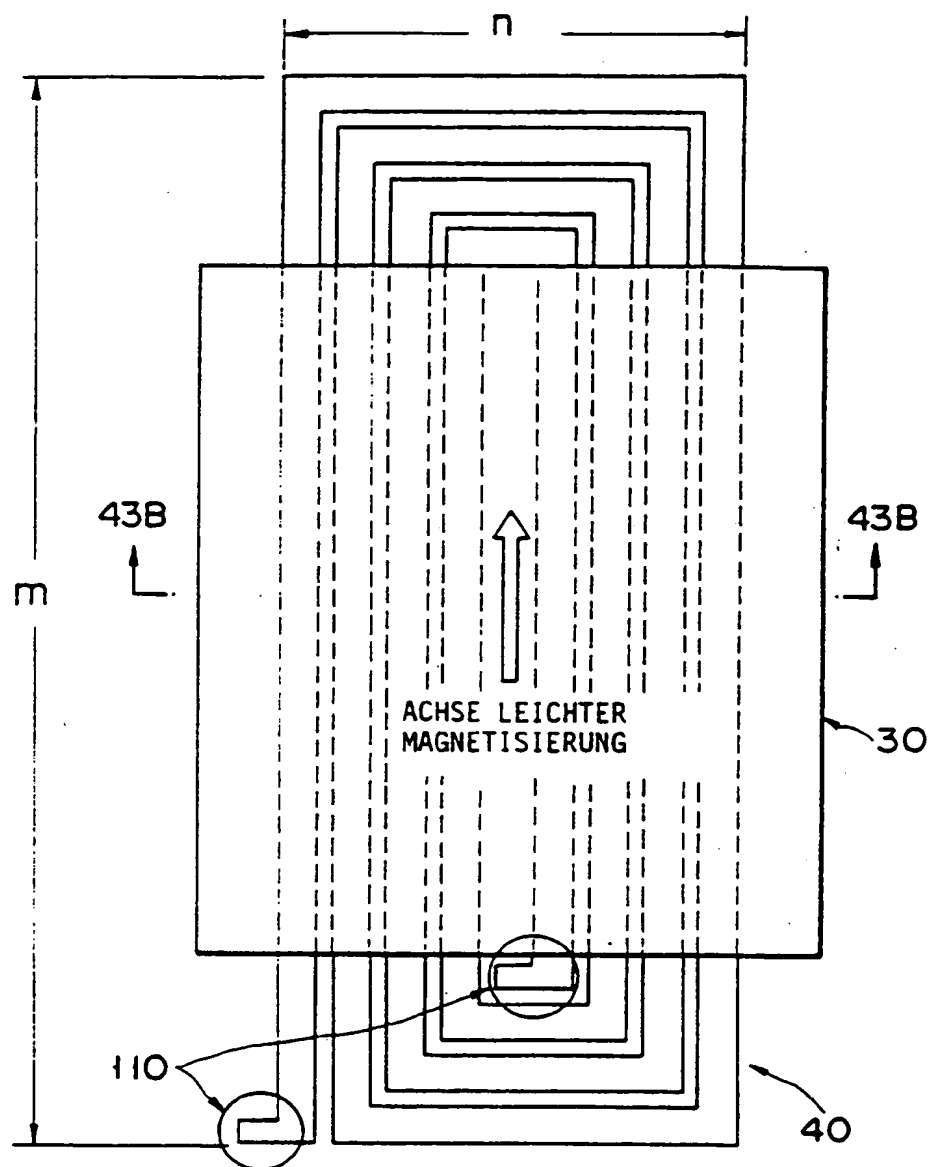
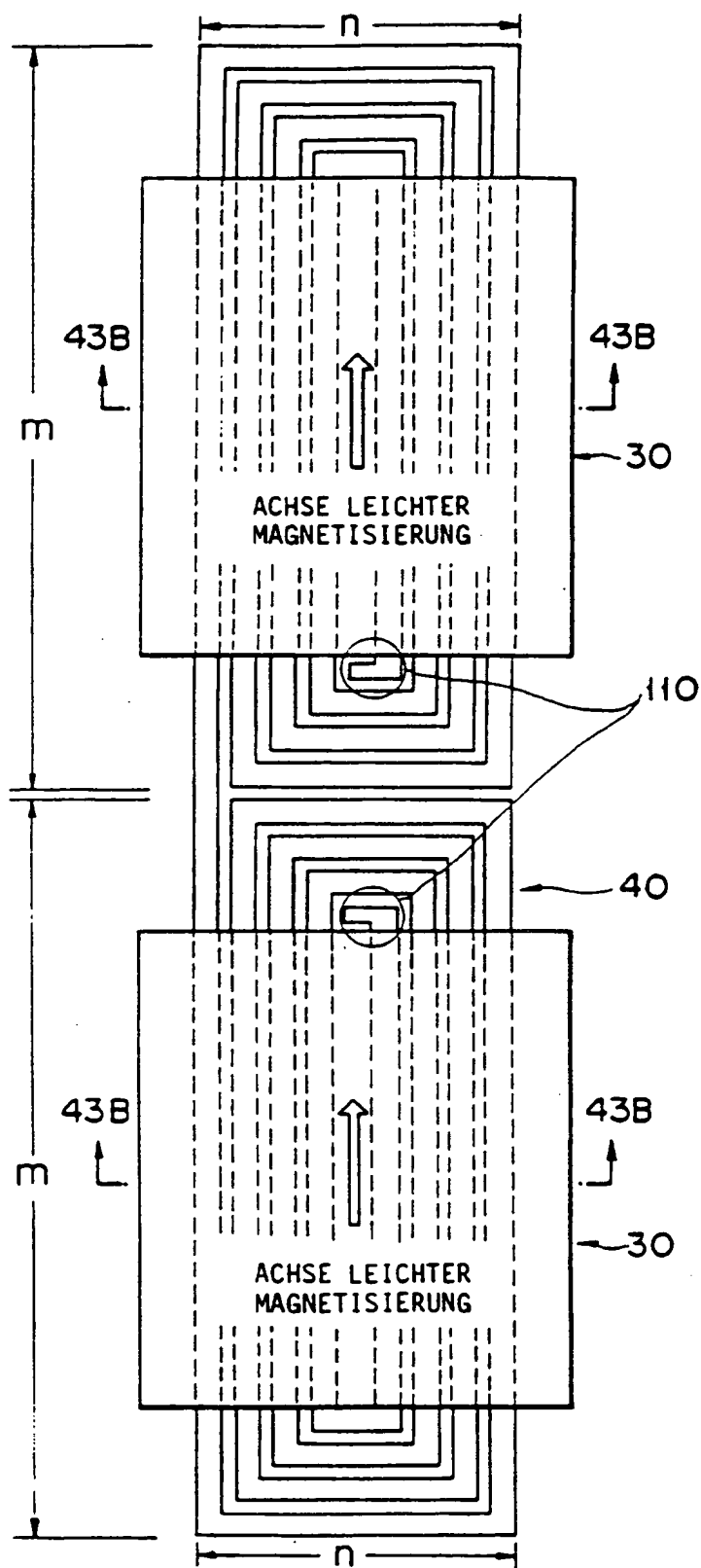


FIG. 44



F I G. 45

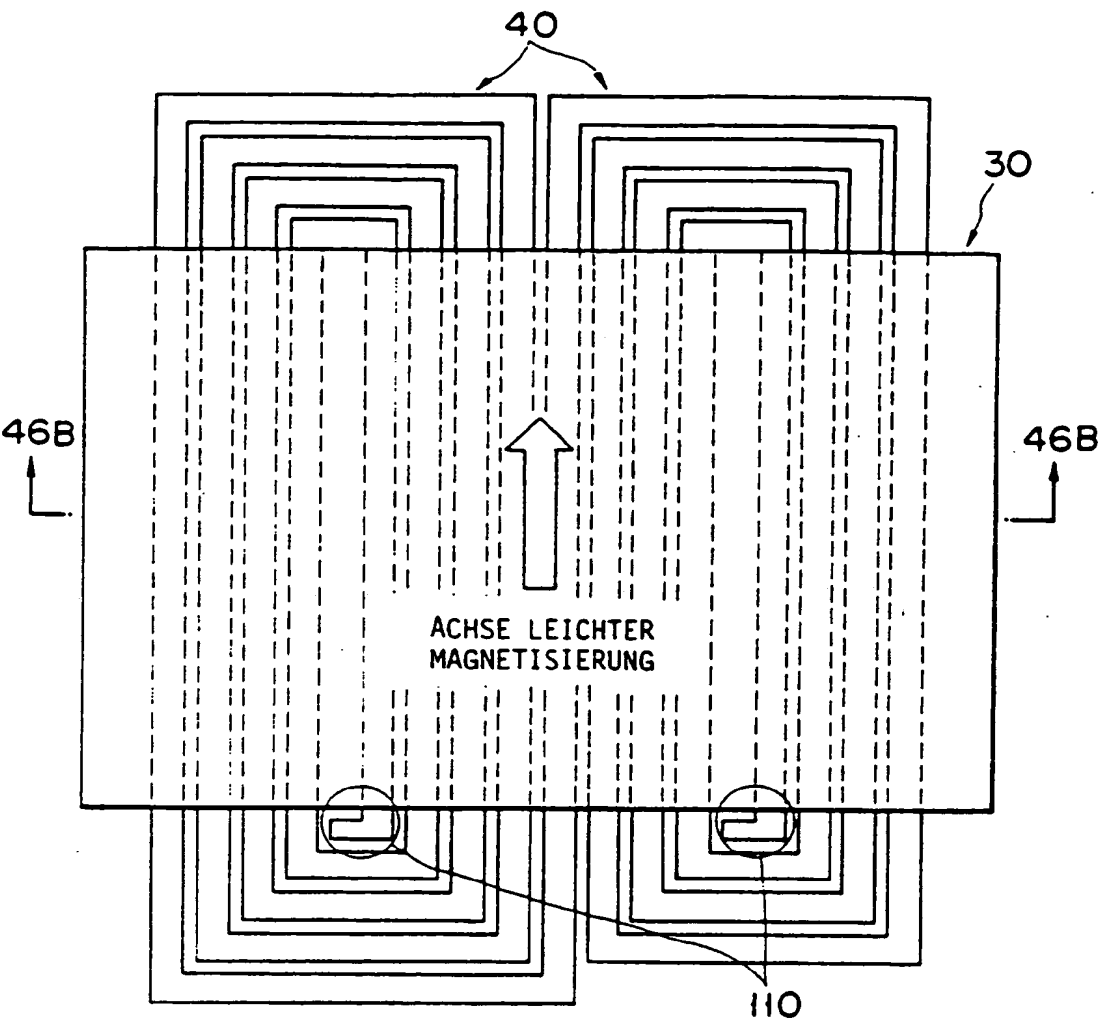


FIG. 46A

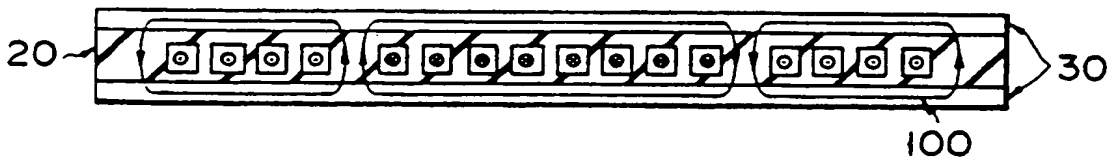


FIG. 46B

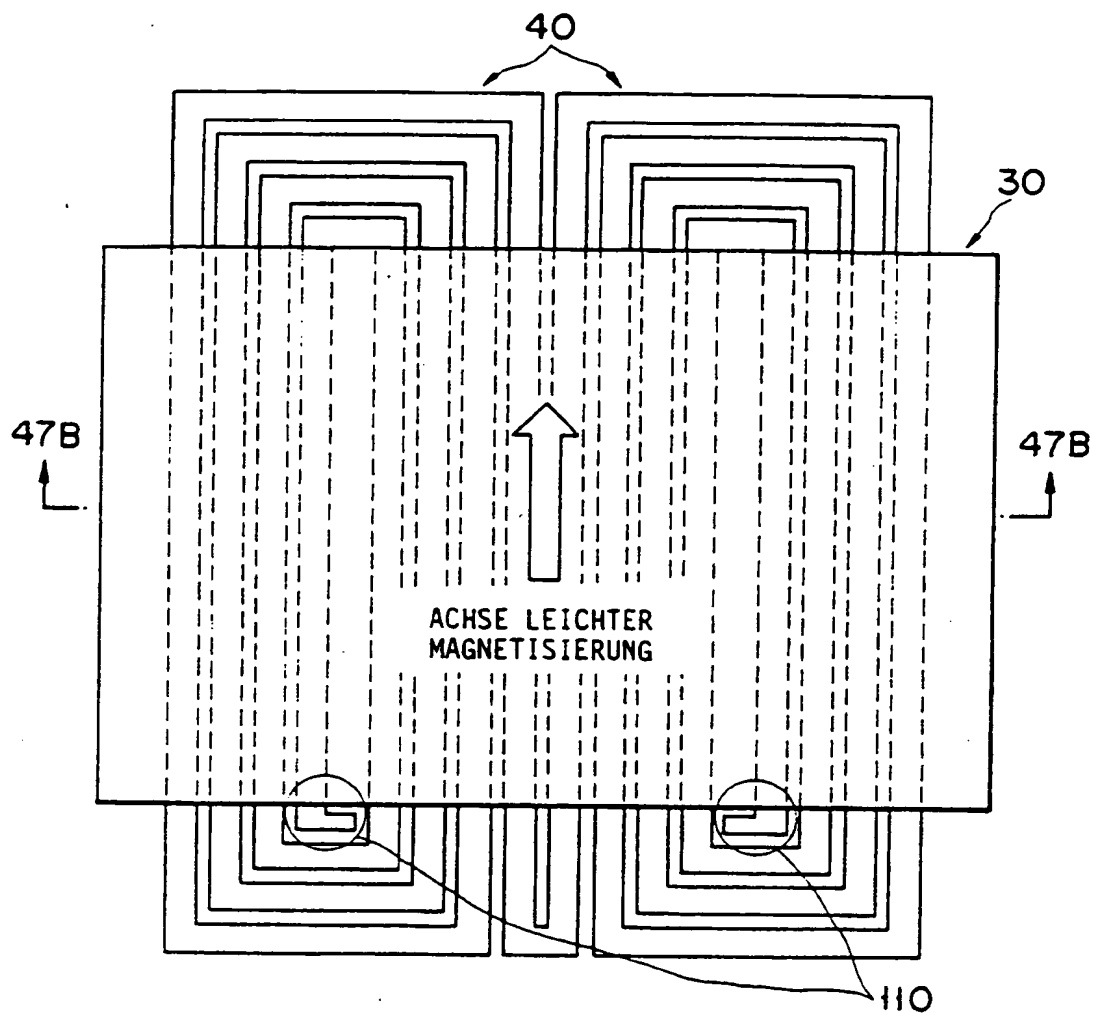


FIG. 47A

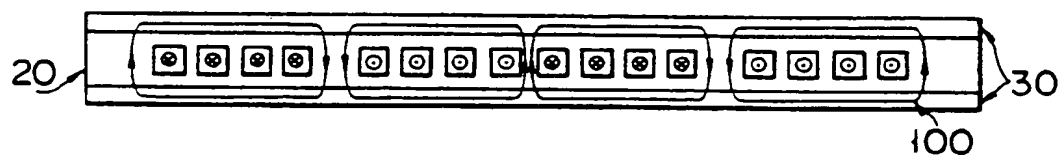


FIG. 47B

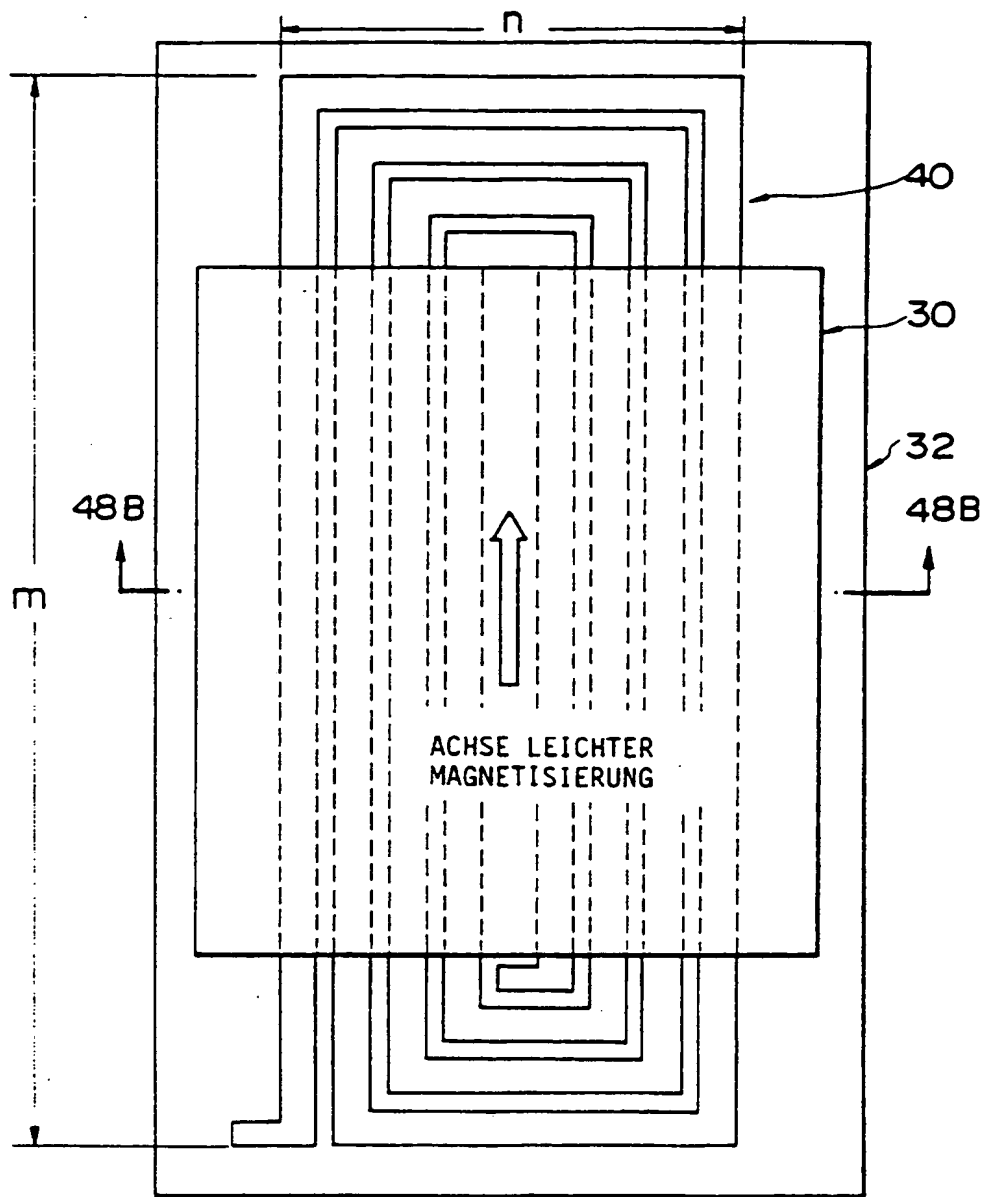


FIG. 48A

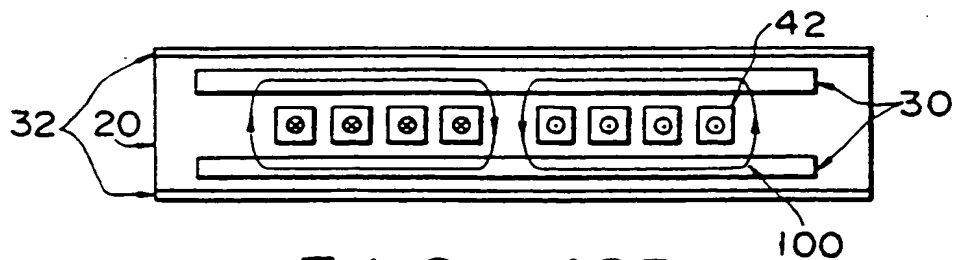


FIG. 48B



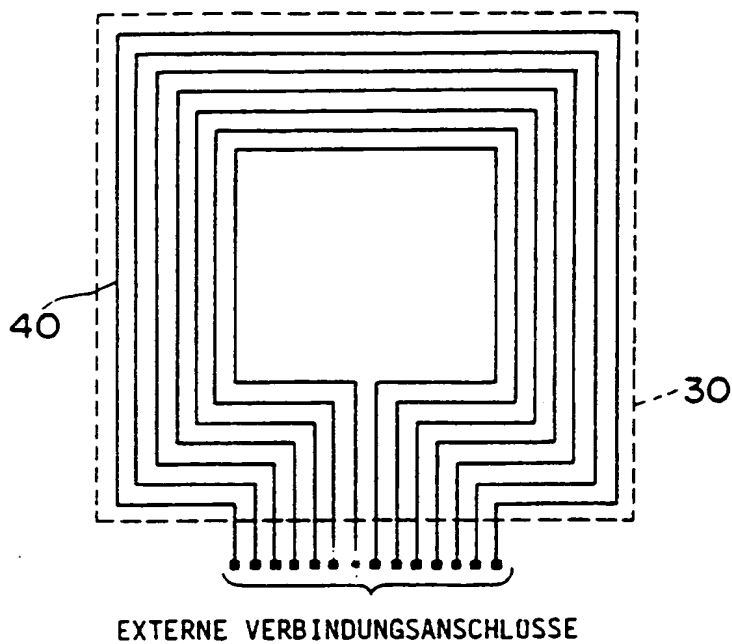


FIG. 49

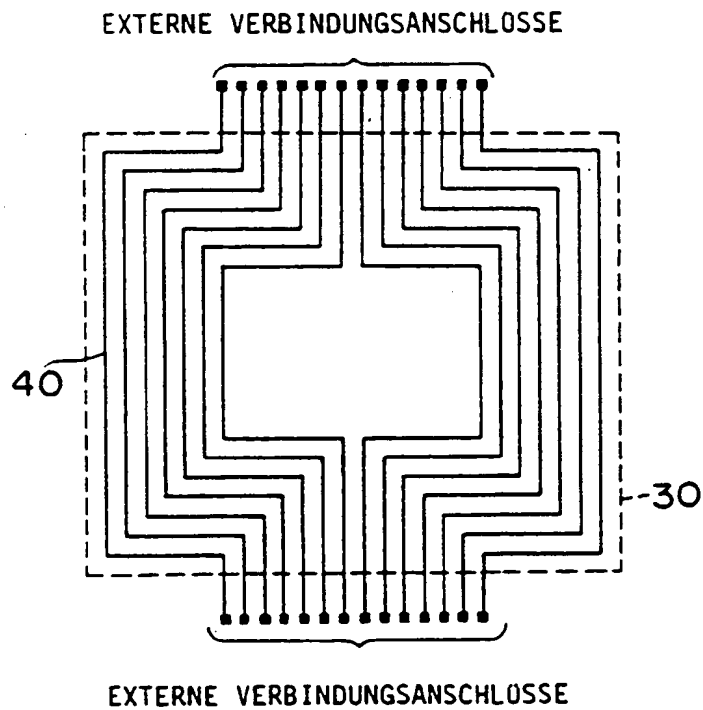
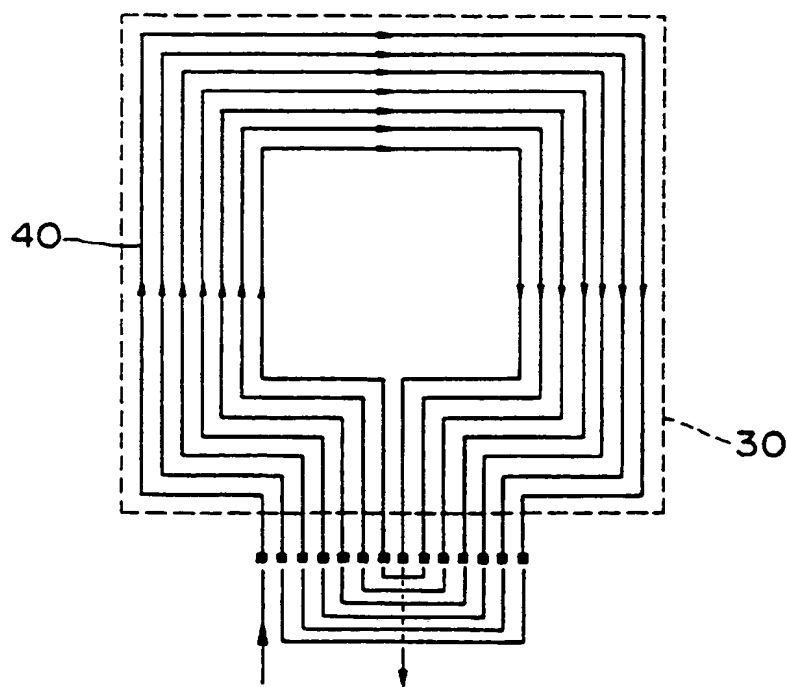
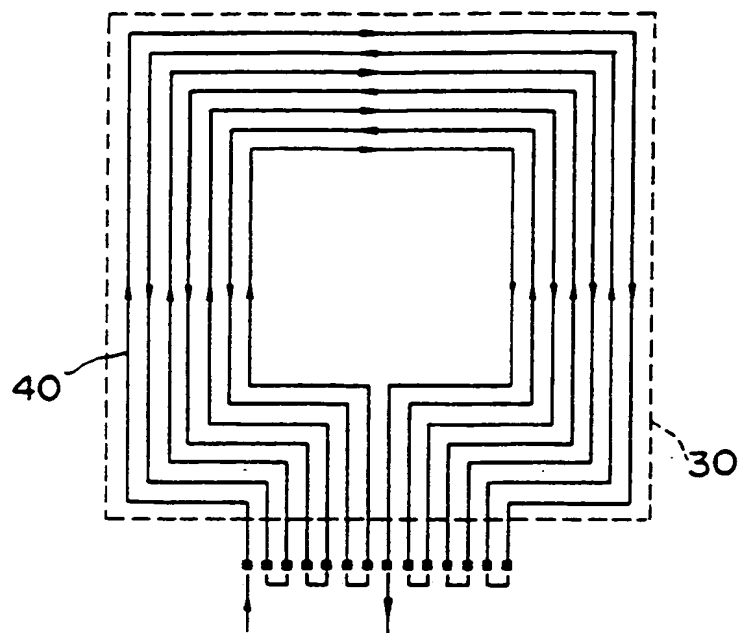


FIG. 50



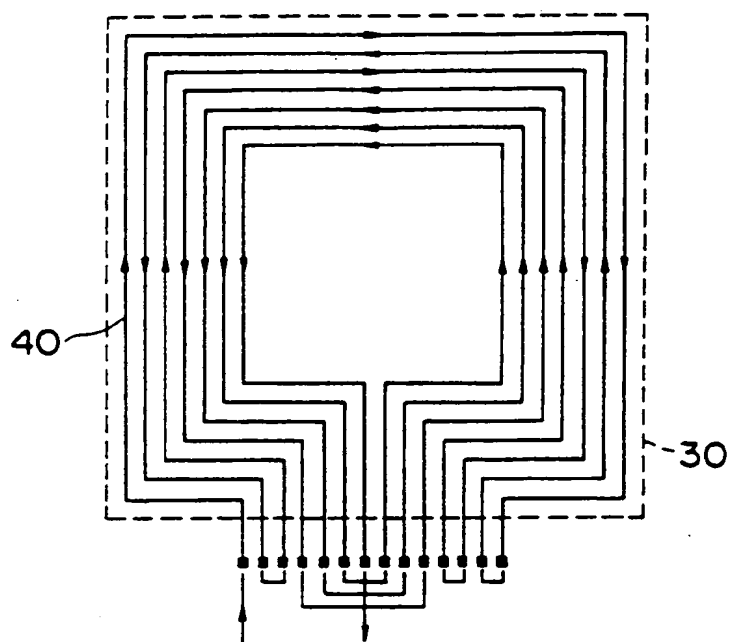
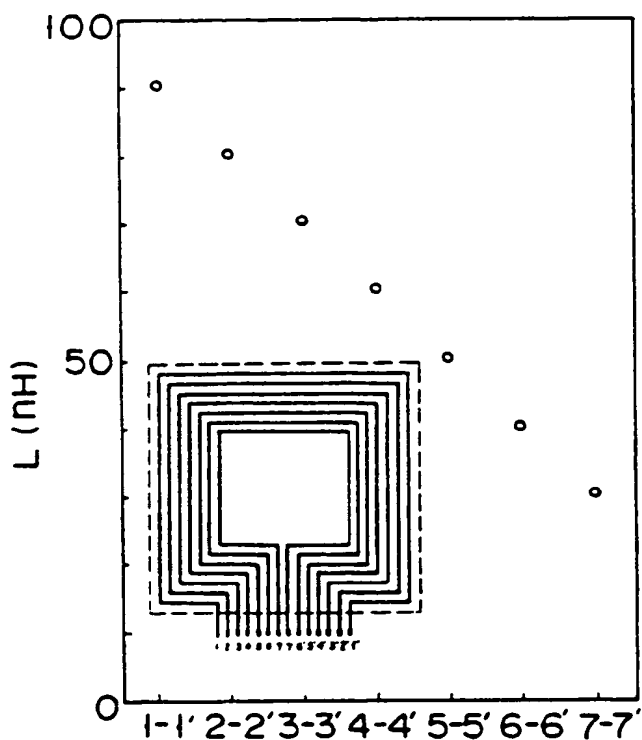
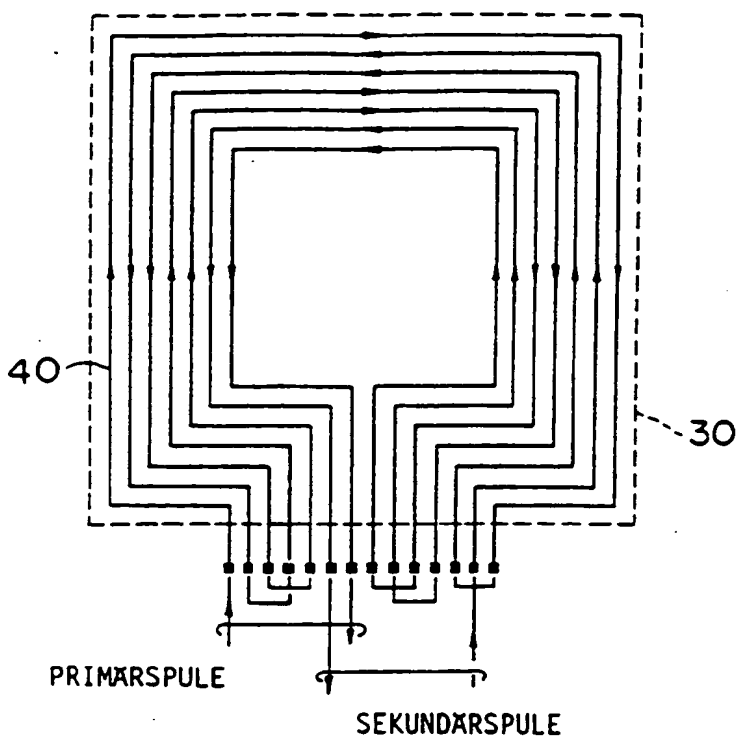


FIG. 53

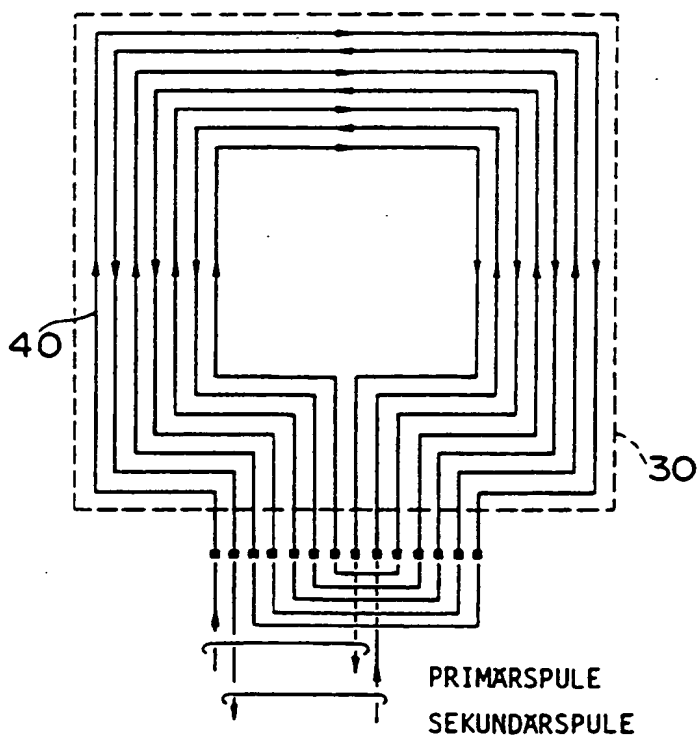


AUSSENANSCHLUSS EINER EINZELWINDUNGSSPULE

FIG. 54



F I G. 55



F I G. 56

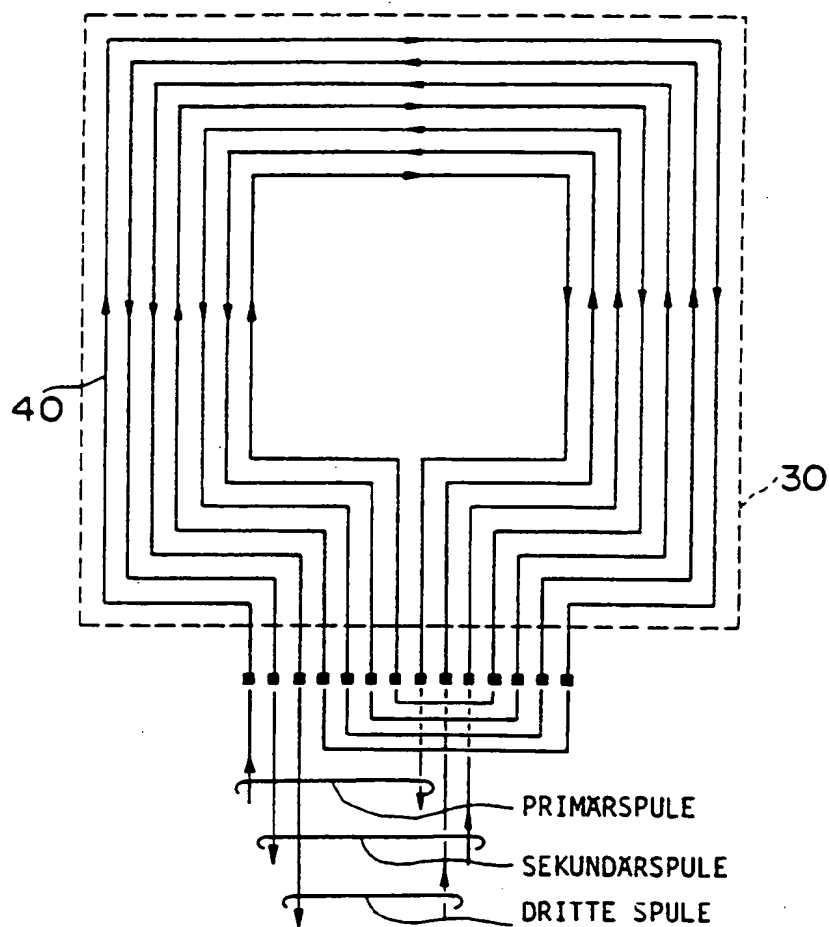


FIG. 57

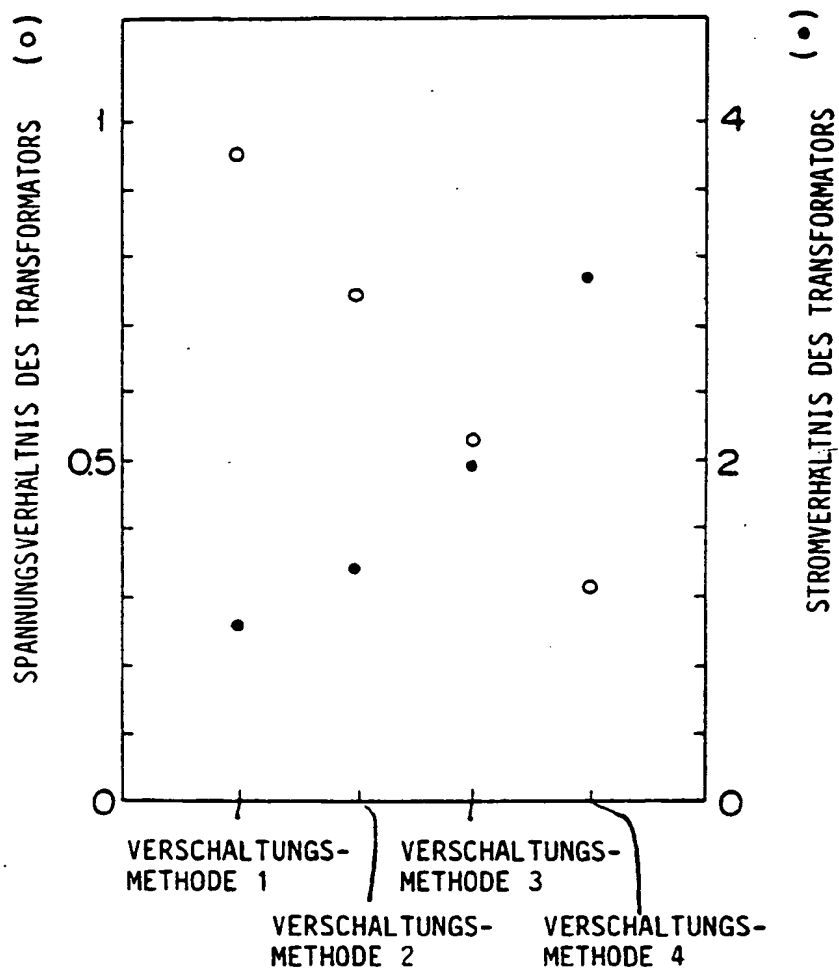


FIG. 58

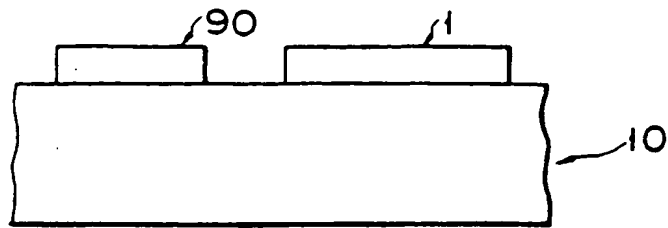


FIG. 59

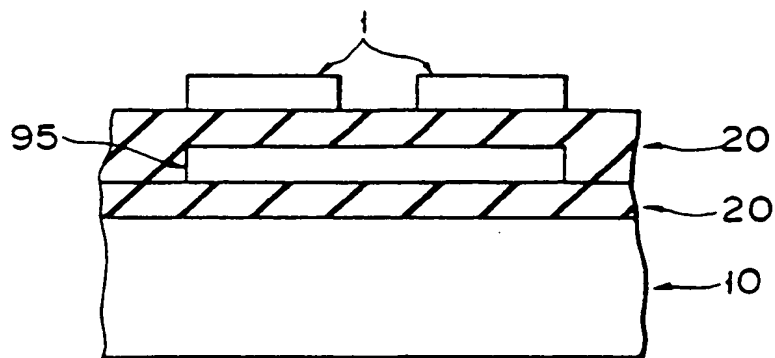


FIG. 60

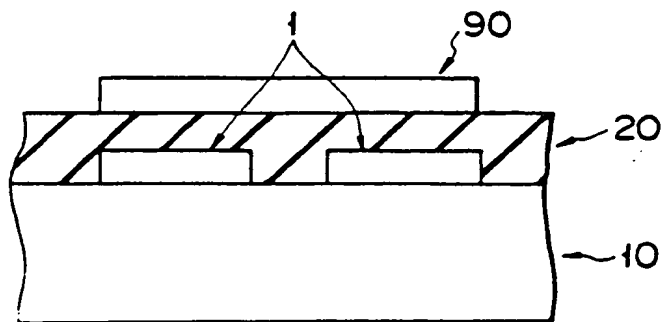
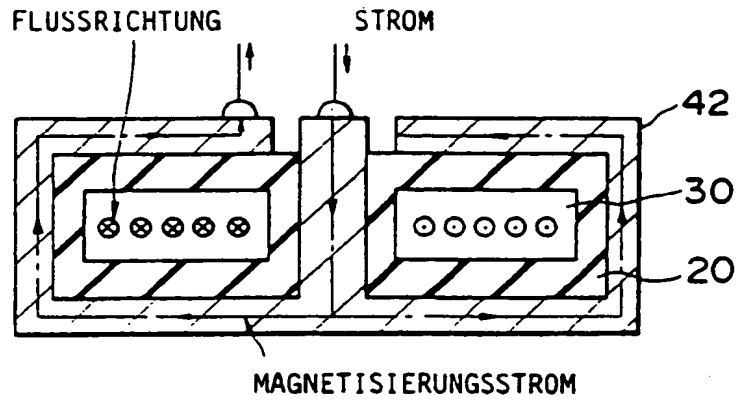
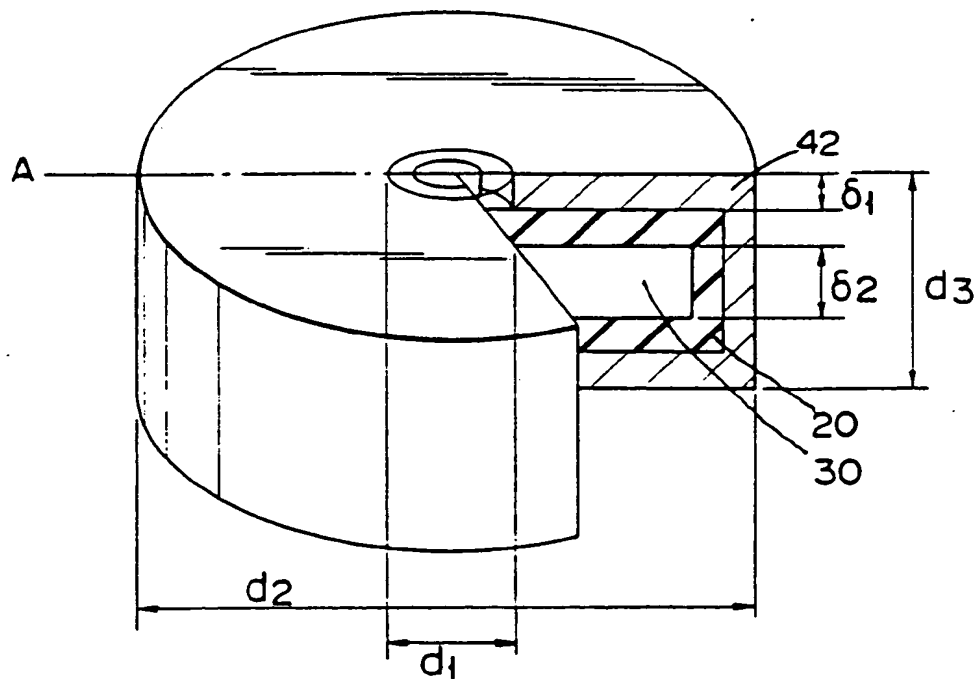


FIG. 61



F I G. 62A



F I G. 62B



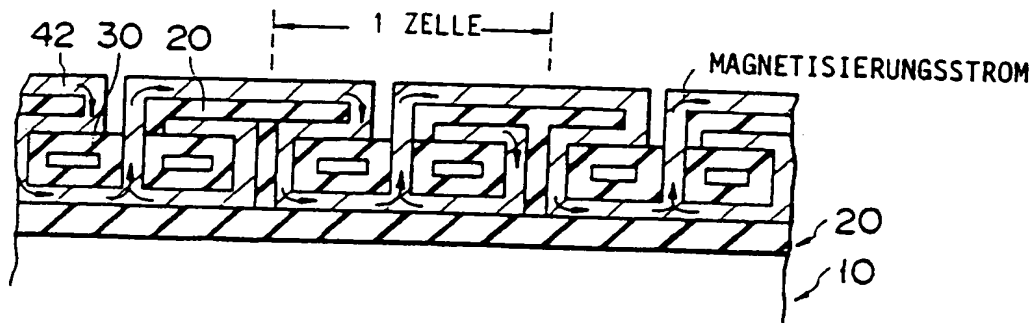


FIG. 63A

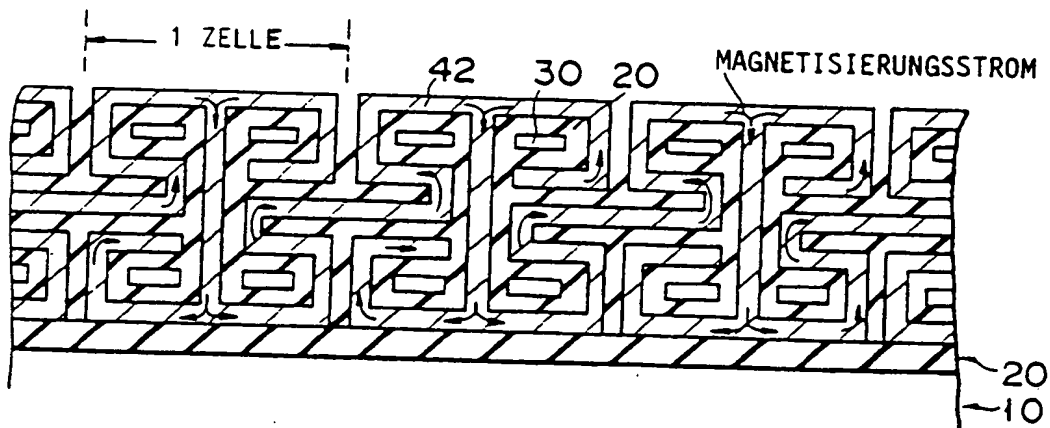
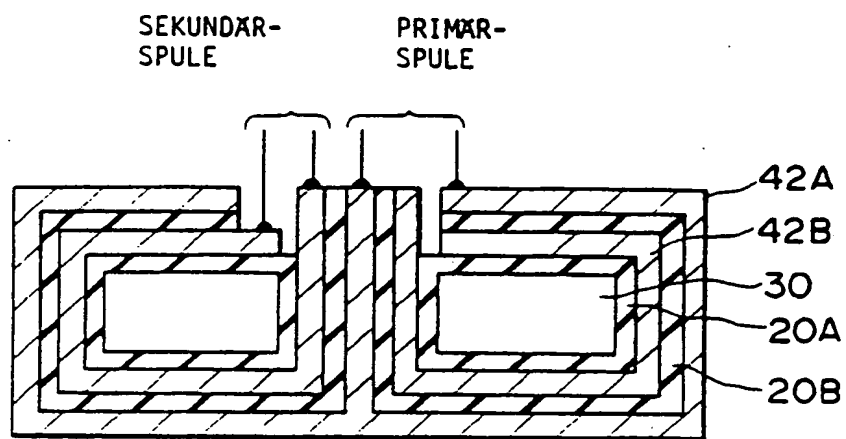
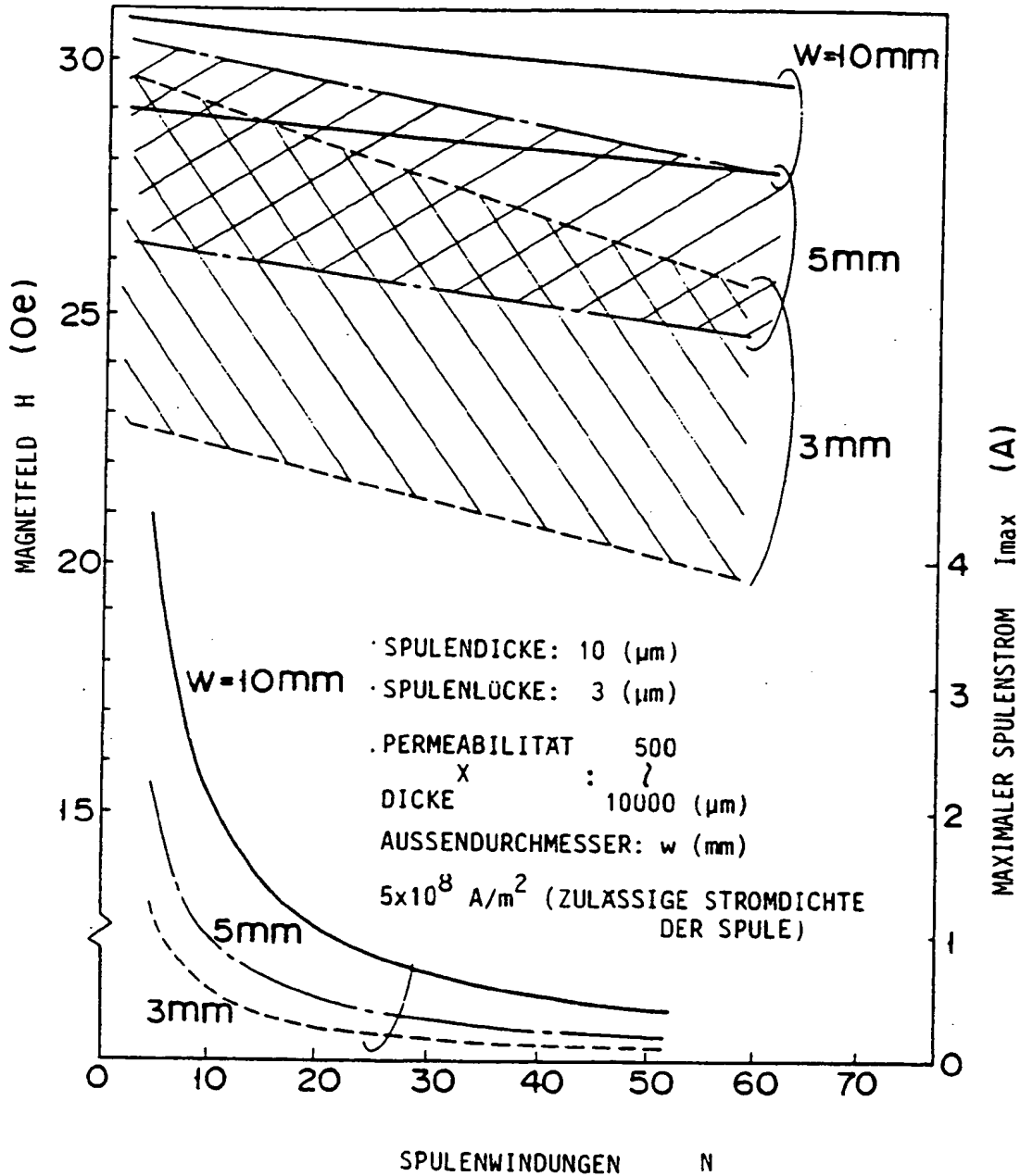


FIG. 63B



F I G. 64



F I G. 65

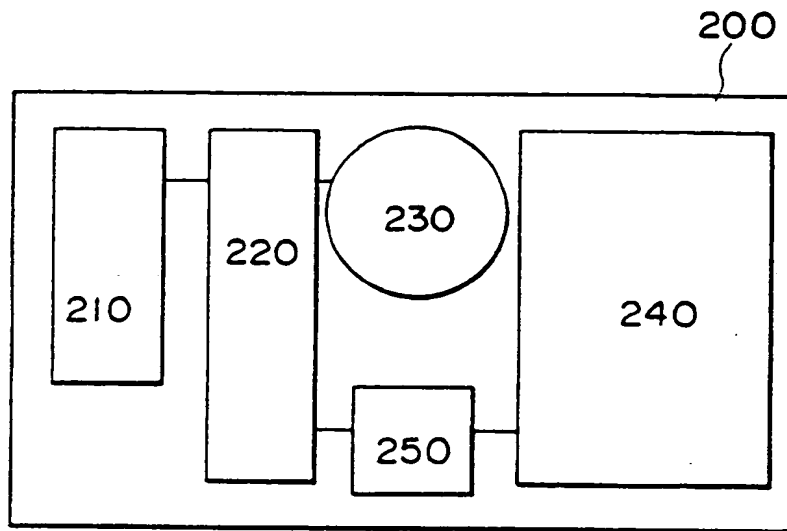


FIG. 66

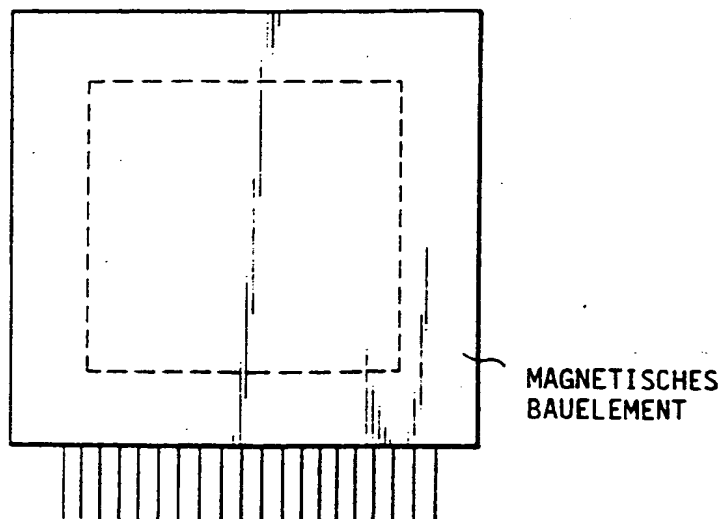


FIG. 67

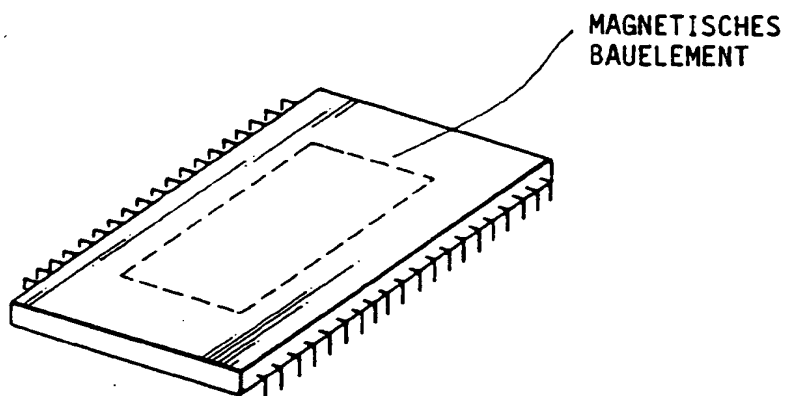


FIG. 68

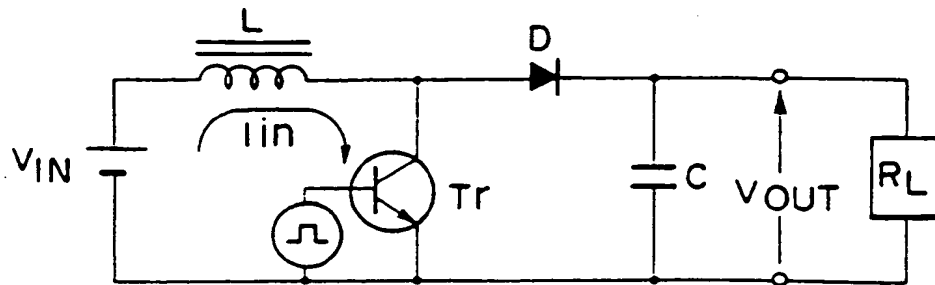


FIG. 69

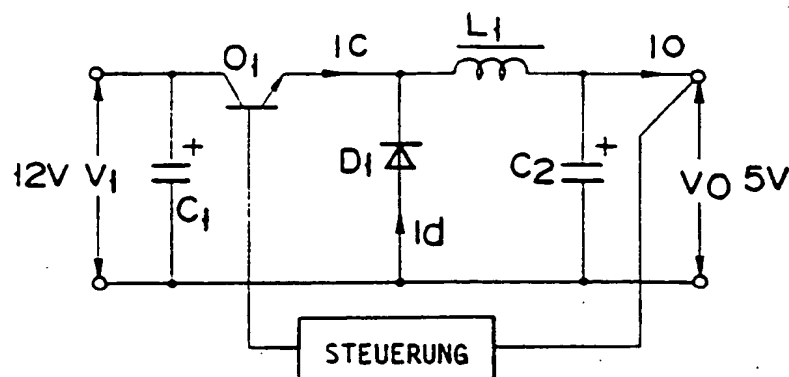


FIG. 70

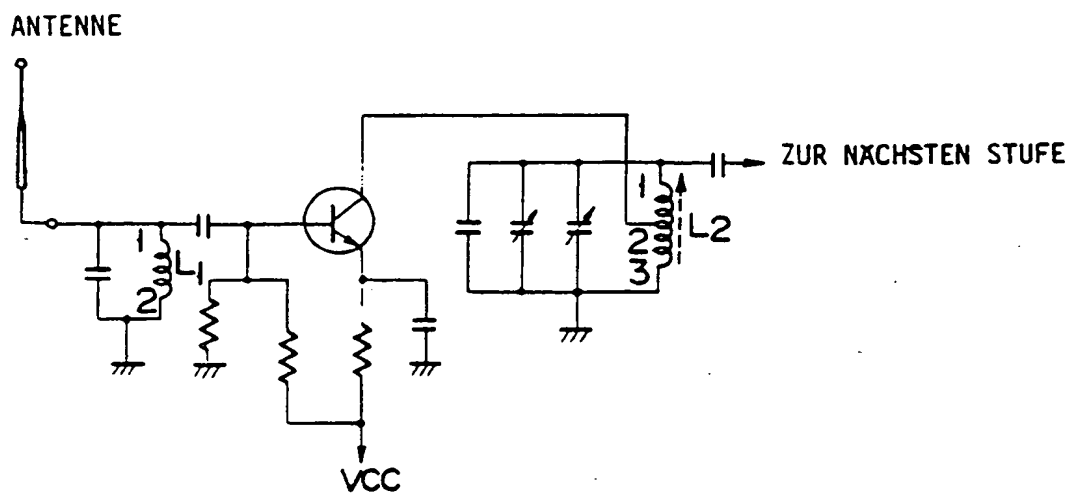


FIG. 71

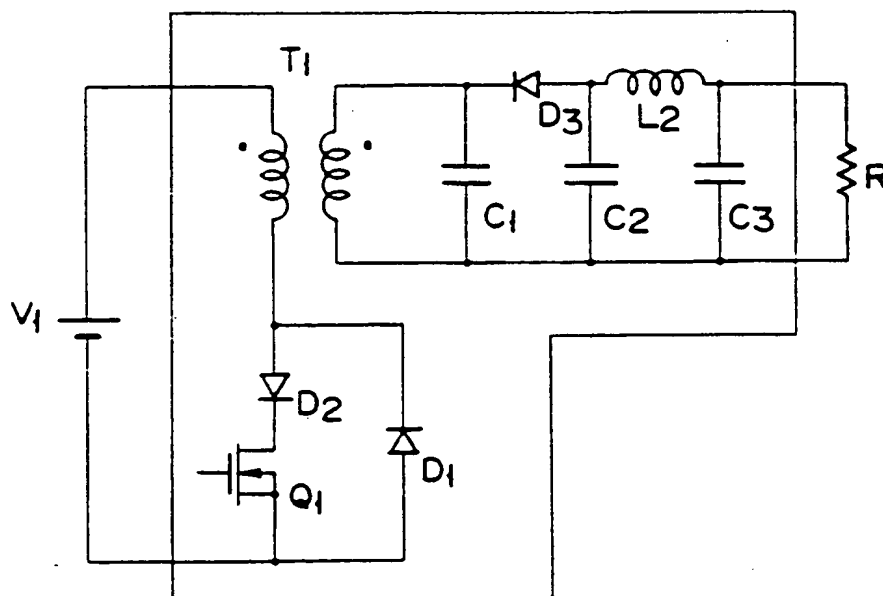
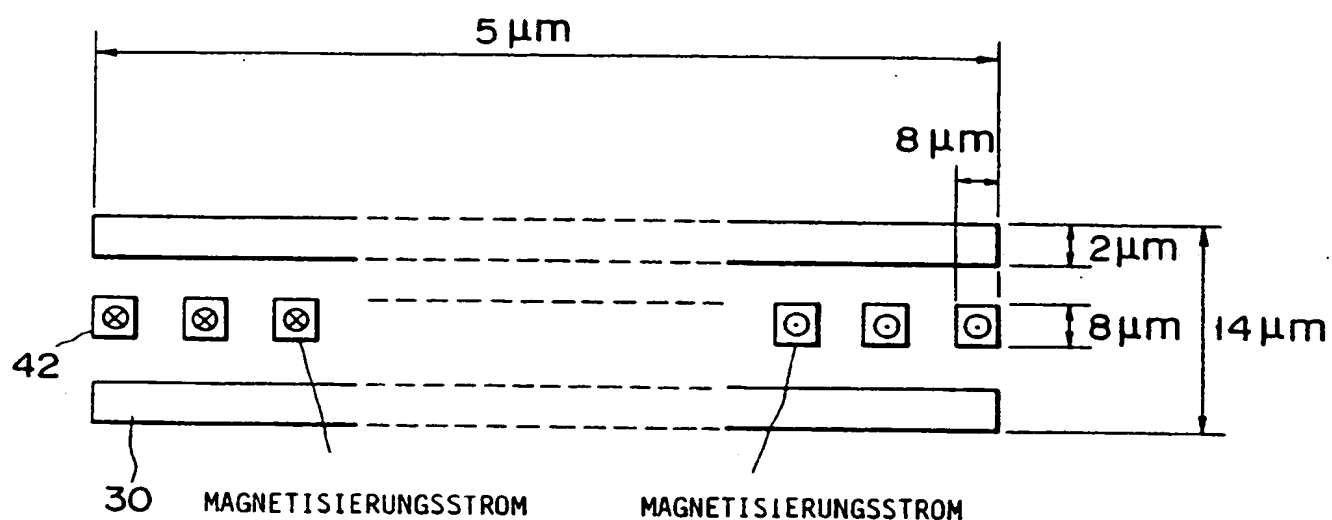


FIG. 72



WINDUNGEN : 125

FIG. 73